



**Maîtrise des excès d'eau hivernaux et de l'irrigation et leurs conséquences sur la productivité de la betterave sucrière dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc).  
Analyse expérimentale et modélisation**

A. Taky

► **To cite this version:**

A. Taky. Maîtrise des excès d'eau hivernaux et de l'irrigation et leurs conséquences sur la productivité de la betterave sucrière dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc). Analyse expérimentale et modélisation. Sciences de l'environnement. Doctorat de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 2008. Français. NNT : . tel-02591443

**HAL Id: tel-02591443**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02591443>**

Submitted on 15 May 2020

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

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

## THÈSE

pour obtenir le grade de

**Docteur**

de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement  
(Agro Paris Tech)**

Spécialité : Sciences de l'eau

présentée et soutenue publiquement  
par

**Abdelilah TAKY**

**le 12 décembre 2008**

**MAITRISE DES EXCES D'EAU HIVERNAUX ET DE L'IRRIGATION ET LEURS  
CONSEQUENCES SUR LA PRODUCTIVITE DE LA BETTERAVE SUCRIERE  
DANS LE PERIMETRE IRRIGUE DU GHARB (MAROC)  
ANALYSE EXPERIMENTALE ET MODELISATION**

*Directeur de thèse : Dr Jean-Claude MAILHOL*

*Codirecteur de thèse : Pr Abdel Hafid DEBBARH*

*Travail réalisé : CEMAGREF, UMR 183 Gestion Eau Acteurs et Usages, F-34196  
Montpellier*

Devant le jury :

|                               |                                                                                        |                                 |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>M. Cyril KAO</b>           | <b>Ingénieur du GREF<br/>AgroParisTech (France)</b>                                    | <b>Président</b>                |
| <b>M. Jean-Claude MAILHOL</b> | <b>Directeur de Recherches au<br/>Cemagref Montpellier<br/>UMR. G-EAU (France)</b>     | <b>Directeur de<br/>Thèse</b>   |
| <b>M. Abdel Hafid DEBBARH</b> | <b>Professeur Secrétaire Général<br/>de l'Education Nationale (Maroc)</b>              | <b>CoDirecteur de<br/>Thèse</b> |
| <b>M. Phillipe ACKERER</b>    | <b>Directeur de Recherches à<br/>l'IMFS de l'Université<br/>De Strasbourg (France)</b> | <b>Rapporteur</b>               |
| <b>M. Ahmed BOUAZIZ</b>       | <b>Professeur à l' IAV Hassan II<br/>(Maroc)</b>                                       | <b>Rapporteur</b>               |
| <b>M. Alain PERRIER</b>       | <b>Professeur à l'INAPG (France)</b>                                                   | <b>Examineur</b>                |
| <b>M. Kamal BENNOUNA</b>      | <b>Ingénieur en Chef Directeur de<br/>l'ORMVAG (Maroc)</b>                             | <b>Invité</b>                   |

*A la mémoire de ma mère*

*Et A*

*Mes deux filles Rahma et Aya  
Ma femme pour tous ses sacrifices  
Mon père, mes frères et sœurs  
A toute ma famille et mes amis*

## Remerciements

Ce travail de thèse, réalisé au Cemagref de Montpellier, UMR G-EAU, m'a permis d'avoir un nouveau regard sur la science un peu différent de celui que j'appréhendais au terme de ma formation d'ingénieur. Cette expérience a été enrichissante à plus d'un titre et a contribué à faire évoluer mon bagage scientifique. C'est pourquoi, je tiens d'abord à adresser mes plus sincères remerciements à Jean Claude Mailhol, mon Directeur de thèse pour son encadrement continu, sa disponibilité et son apport fondamental en modélisation. Mes remerciements s'adressent également au Pr. Abdel Hafid Debbarh, Codirecteur de cette thèse, et qui, de par sa connaissance du contexte et son expérience a permis de rendre ce projet réalisable. Son soutien et son apport n'ont été d'une grande utilité. Je suis très reconnaissant à Sami Bouarfa pour sa patience, ses conseils et ses discussions toujours fructueuses et son soutien inconditionnel durant toute la période de préparation du DEA et de cette thèse.

Je remercie également Thierry Rieu ex chef de l'Unité d'irrigation du Cemagref de Montpellier et Patrice Garin Directeur de l'UMR G-EAU de m'avoir accueilli au sein de leur unité de recherche. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Abed Alami Sounni, ex Directeur de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb, pour m'avoir autorisé à reprendre mes études. M. Ahmed Sbihi, son successeur de m'avoir autorisé à poursuivre mes démarches et l'actuel Directeur Mr Kamal Bennouna, d'achever mon entreprise. Qu'ils trouvent tous dans ce travail, l'expression de mon profond respect.

Un grand merci au projet SIRMA (Systèmes **IR**igués au **Maghreb**, [www.eau-sirma.net](http://www.eau-sirma.net)) dans le cadre duquel cette thèse a été réalisée. Son concours a été important pour le déroulement et la réalisation du travail. Je remercie également Pr. Ali Hammani de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, partie prenante de ce travail, pour tout l'appui qu'il m'a apporté et son aide toujours précieuse. D<sup>r</sup> Marcel Kuper est remercié pour son soutien sans faille et son encouragement continu. D<sup>r</sup> Pierre Ruelle est vivement remercié pour son soutien au déroulement des expérimentations sur la betterave à sucre. De même, je tiens à remercier le Pr. Kamal Belabbes pour sa contribution à la réalisation par la mise à ma disposition d'une station automatique complète pour l'acquisition des données climatiques à la station de Souk Tlet. Mes remerciements s'adressent aussi au D<sup>r</sup> Serge Marlet d'avoir œuvré auprès de la Coopération Française pour mettre à ma disposition la bourse pour la réalisation de la partie théorique du DEA.

La mesure du ruissellement a été rendue possible grâce à l'aide précieuse et efficace de M<sup>r</sup> Cedric Chaumont de l'Unité Ouvrages pour le Drainage et l'Etanchéité du Cemagref d'Antony pour l'instrumentalisation du regard de mesure et l'entretien de l'ensemble des appareillages

d'acquisition de données de la station de Souk Tlet. M<sup>r</sup> Mustapha Raji est remercié aussi pour son apport à la mise en place du regard de mesure et à la réalisation du nivellement. M<sup>r</sup> Laurent Delage est vivement remercié pour l'installation des capteurs TDR pour la mesure de la teneur en eau du sol et l'étalonnage des capteurs en question.

J'exprime mes vifs remerciements au Pr Ahmed Bouaziz de l'IAV Hassan II et Phillipe Ackerer Directeur de Recherches à l'institut de Mécaniques de Fluides de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Mes remerciements s'adressent aux membres de jury ayant accepté de juger ce travail et au Pr Ali Hammani et Dr Sami Bouarfa d'avoir participé à l'enrichissement des débats.

J'exprime ma gratitude à Marie Claude Lafforgue et à Sami Branci pour l'aide précieuse apportée pour la résolution de mes ennuis informatiques, ainsi qu'à Carole Giansily et Myriam Taoussi pour leurs initiations à la recherche bibliographiques dans les fonds documentaires du Cemagref. Je ne peux oublier de remercier Chatal Miralles de l'AFEID pour la gestion de la logistique de mes missions en France ainsi que Christine Moretti et Josiane Dartau du Cemagref.

Mes remerciements s'adressent également à : M<sup>r</sup> El Mostafa Atif ex Chef du Service d'Exploitation et actuel Chef du Département des Aménagements à l'ORMVAG pour son soutien et sa compréhension durant des moments difficiles pour la réalisation de ce travail, MM Mohamed Benali et Abdelkader Hammoumi d'avoir assuré l'intérim en mon absence respectivement du Bureau des Techniques des Irrigations et de Drainage et du Service des Aménagements, à mes anciens collègues du Bureau Techniques des Irrigations et de Drainage (MM Houssaini, Belbachir et Mme Kahouli), M<sup>r</sup> Abdel Aziz Bousraref pour la mise à ma disposition des semences de betterave à sucre, M<sup>r</sup> Mohamed Mrini pour toute l'aide apportée pour la réalisation des analyses des échantillons de betterave à sucre et à mes collègues du CTCS notamment MM Nadif et Guebbassi et toutes les personnes de l'ORMVAG, du Cemagref et les étudiants de l'IAV HassanII notamment SANOGO ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Je tiens aussi à remercier MM. Mohamed Benmahdia et Bouchaib Lkdani agriculteurs d'avoir mis à notre disposition des parcelles pour la réalisation des essais expérimentaux.

Je saisis cette occasion pour remercier Mr Alain Delacourt pour sa disponibilité et son écoute.

Mes remerciements à Amar pour sa disponibilité et son soutien durant mes séjours en France.

## Résumé

La plaine du Gharb au Maroc, souffre d'excès d'eau pendant l'hiver et du déficit hydrique en été. Cet état de fait explique la faible rentabilité des investissements hydro agricoles réalisés à ce jour par le gouvernement. L'originalité de ce travail réside dans le fait de relier l'évacuation des eaux de surface excédentaires au cours de l'hiver, et la satisfaction des besoins en eau de la culture dès le printemps où elle commence à connaître un déficit hydrique.

Deux objectifs sont assignés à ce travail : (i) l'évaluation des performances hydrauliques et agronomiques du drainage de surface et (ii) l'évaluation de l'impact de l'excès d'eau sur la culture de la betterave à sucre. Il repose sur (i) une approche expérimentale et (ii) une modélisation des processus en question. Pour ce faire, des comparaisons ont été effectuées entre trois parcelles : (i) une parcelle nivelée selon une pente  $S_0$  de 0.2 % et irriguée à la raie, (ii) une parcelle non nivelée irriguée par aspersion et (iii) une parcelle nivelée selon une pente  $S_0$  de 0.2% dans la même sens que la première parcelle mais dépourvue de raies et irriguée par aspersion.

L'étude expérimentale a clairement démontré la capacité d'une parcelle avec raies à évacuer efficacement les excès d'eau pendant l'hiver comparativement à une parcelle non nivelée. Sur cette dernière, les submersions locales affectent fortement la production de la betterave à sucre. Le système de raies fournit les meilleurs rendements suivis de près par le système nivelé irrigué par l'aspersion.

Un modèle de ruissellement a été spécifiquement développé pour la prédiction du volume ruisselé et du débit maximal de ruissellement à l'exutoire d'une parcelle avec raies soumise à des événements pluvieux intermittents et d'intensités variables. Ce modèle utilisant entre autre pour entrée le hyetogramme de pluie d'une période de retour 1 an met en évidence le sous dimensionnement des fossés destinés à recueillir les eaux à l'aval des parcelles chez les agriculteurs. Les performances agronomiques de la raie ont été évaluées à l'aide du modèle SOFIP qui simule l'impact de l'irrigation à la raie sur la productivité de l'eau. Pour la parcelle non nivelée, le modèle PILOTE a été adapté pour simuler l'impact de la submersion sur la productivité de la betterave à sucre. Les simulations du rendement effectuées sur une série de onze années montrent clairement l'avantage du système gravitaire modernisé par rapport au système aspersionnel non nivelé et ce, pour différentes dates de semis. On peut pour conclure affirmer que le développement agricole dans la plaine du Gharb doit être raisonné en tenant compte des excès d'eau hivernaux préjudiciables aux cultures.

**Mots clés : drainage de surface, le drainage, ruissellement, expérimentation, raie, nivellement, betterave à sucre, modélisation, simulation, Gharb, Maroc.**

## Abstract

The Gharb plain (Morocco) suffers from water excess during winter and from water deficit during summer. This state of fact explains the low profitability resulting from the irrigation investment efforts realized by government. The originality of this work results from the combination of two objectives devoted to the furrow system. The first consists on the evacuation of the surface water excess during winter, and the second on the water supply to crops from the beginning of spring.

Two objectives are assigned to this work: (i) evaluation of hydraulic and agronomic performances of surface drainage and (ii) evaluation of the impact of water excess on sugar beet. The work is based on: (i) experimental and (ii) modelling approaches. For that, comparisons have been carried out between three plots: (i) a levelled plot furrow irrigated with a slope  $S_0 = 0.2\%$ , (ii) unlevelled plot irrigated by sprinklers and (iii) a levelled plot in the same direction as the furrow irrigated plot but without furrows and irrigated by sprinklers.

The experimental study has clearly demonstrated the capability of the furrow system to evacuate efficiently the water excess during winter compared with the unlevelled plot system. On the latter, local pondings strongly affect the sugar beet production. At the opposite, the furrow system provides the highest sugar beet yield, closely followed by the levelled sprinkler system.

A runoff model was specifically developed for predicting volume and peak discharge runoff at the outlet of a furrow system subject to an unsteady and intermittent rain event. Using a 1 year return period rainfall event as input, the simulation results show that most part of the plot ditches are not correctly designed. The agronomic performance of the furrow system was evaluated using SOFIP, a model simulating the impact of furrows irrigation practices on the water productivity. For the unlevelled irrigated plot, the crop model PILOTE has been adapted to simulate ponding conditions and their impact on the sugar beet production. Simulation yields carried out on a series of eleven years clearly showed the advantage of the modernised furrows system on the unlevelled one sprinkler irrigated what ever the sowing dates. In the Gharb context, one can say that agricultural development should be reasoned taking into account water excess during winter harmful to crops.

**Keywords:** Surface drainage, drainage, furrow, grading, runoff, testing, sugar beet, modeling, simulation, Gharb, Morocco

## Table des matières

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Remerciements .....                                                           | 3  |
| Résumé .....                                                                  | 5  |
| Abstract .....                                                                | 6  |
| Liste des figures .....                                                       | 10 |
| Liste des abréviations .....                                                  | 14 |
| Liste des symboles .....                                                      | 15 |
| Chapitre I. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE .....                               | 19 |
| Chapitre II. RUISSELLEMENT ET SUBMERSIONS LOCALES .....                       | 29 |
| ASPECTS EXPERIMENTAUX .....                                                   | 29 |
| II. 1. Introduction .....                                                     | 29 |
| II.2. Définition du ruissellement .....                                       | 29 |
| II.3. Définition et mécanismes de ruissellement .....                         | 30 |
| II.4. Mécanismes de ruissellement .....                                       | 31 |
| II.5. La propagation du ruissellement.....                                    | 32 |
| II.6. Conséquences des submersions .....                                      | 32 |
| II.7. Le périmètre irrigué du Gharb .....                                     | 33 |
| II.7.1. Cadre géographique et physique.....                                   | 33 |
| II.7.2. Aménagements hydro agricoles.....                                     | 35 |
| II.8. La station expérimentale de Souk Tlet .....                             | 40 |
| II.8.1. Contexte physique .....                                               | 40 |
| II.8.2. Dispositif expérimental.....                                          | 41 |
| II.8.3) Protocole expérimental.....                                           | 42 |
| II.8.4. Observations réalisées .....                                          | 53 |
| II. 9. Expérimentations chez les agriculteurs .....                           | 60 |
| II.10. Résultats et discussions .....                                         | 61 |
| II.10.1. Caractérisation climatique : bilans pluie – demande climatique ..... | 61 |
| II.10.2. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du ruissellement.....     | 63 |

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| II.10.3. Analyses des paramètres agronomiques .....                                                                                                  | 72  |
| II.10.3. Analyse des rendements .....                                                                                                                | 76  |
| II.10.4. Efficience agronomique de l'irrigation.....                                                                                                 | 84  |
| II.10.5. Etude expérimentale des effets des stagnations d'eau sur la croissance de la<br>betterave à sucre .....                                     | 86  |
| II. 11. Conclusions .....                                                                                                                            | 88  |
| Chapitre III. MODELISATION DU RUISSELLEMENT DANS UN SYSTEME DE RAIES<br>ET DE L'IMPACT DE LA SUBMERSION SUR LA CULTURE DE BETTERAVE A<br>SUCRE ..... |     |
| III.1. Rappel du contexte et de la problématique .....                                                                                               | 91  |
| III.2. Modélisation du système de raies modernisées (cas de la parcelle nivelée dotées de<br>raies longues irriguée gravitairement).....             | 91  |
| A. Modélisation du ruissellement à travers le système de raies.....                                                                                  | 93  |
| 1. Introduction .....                                                                                                                                | 98  |
| 2. Model development.....                                                                                                                            | 100 |
| 2.1. Production function .....                                                                                                                       | 101 |
| 2.1.1 Runoff production during a rainfall event.....                                                                                                 | 102 |
| 2.1.2. Soil parameters .....                                                                                                                         | 103 |
| 2.1.3. A new procedure to account for rainfall intermittence.....                                                                                    | 104 |
| 2.2 Transfer model .....                                                                                                                             | 104 |
| 2.2.1. Model equations .....                                                                                                                         | 104 |
| 2.2.2. Numerical solution .....                                                                                                                      | 105 |
| 3. Field Experiments .....                                                                                                                           | 106 |
| 4. Model Calibration and Validation.....                                                                                                             | 107 |
| 4.1. Calibration during irrigation events .....                                                                                                      | 107 |
| 4.2. Model calibration during rainfalls.....                                                                                                         | 108 |
| 4.3. Sensitivity Analysis.....                                                                                                                       | 114 |
| 5. Application to drainage issues.....                                                                                                               | 115 |
| 6. Conclusion.....                                                                                                                                   | 117 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| B. Modélisation de l'irrigation .....                                                                                                                 | 120 |
| III.3. Modélisation du système aspersion .....                                                                                                        | 147 |
| III.3.1. Introduction .....                                                                                                                           | 147 |
| III.3.2. Etat de l'art .....                                                                                                                          | 148 |
| III.3.3. Définition de l'objet à modéliser et choix du modèle .....                                                                                   | 150 |
| III.3.4. Adaptation du modèle PILOTE à la simulation des durées de submersion et à leur impact sur la production (version PILSUM).....                | 150 |
| III.3.4.1. Adaptations préconisées du modèle PILOTE .....                                                                                             | 150 |
| III.3.4.2. Simulation des excès d'eau sur une parcelle non planée virtuelle (Type non nivelée irriguée en aspersion) et impact sur le rendement ..... | 155 |
| III.3.4.3. Test de la version PILSUM sur le cas d'une parcelle drainée en surface (raies) et en profondeur (drains) .....                             | 156 |
| III.3.5. Conclusion.....                                                                                                                              | 158 |
| Chapitre IV. SIMULATION DE LA PRODUCTION.....                                                                                                         | 161 |
| IV.1. Introduction.....                                                                                                                               | 161 |
| IV.2. Simulation des rendements .....                                                                                                                 | 162 |
| IV.3. Valorisation de l'eau d'irrigation.....                                                                                                         | 166 |
| IV.4. Conclusion .....                                                                                                                                | 168 |
| Chapitre V. CONCLUSION GENERALE .....                                                                                                                 | 169 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....                                                                                                                     | 174 |
| ANNEXES .....                                                                                                                                         | 192 |

## Liste des figures

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Evolution des superficies travaillées et semées en fonctions du cumul des précipitations (septembre-novembre).....              | 22 |
| Figure 2. Evolution des rendements des céréales en fonctions des précipitations .....                                                     | 24 |
| Figure 3. Evolution des rendements des céréales en fonction du cumul des précipitations de novembre à janvier .....                       | 25 |
| Figure 4. Carte du Maroc avec localisation du périmètre irrigué du Gharb.....                                                             | 34 |
| Figure 5. Carte des différentes tranches d'aménagement du périmètre du Gharb .....                                                        | 36 |
| Figure 6. Dispositif expérimental de la station de Souk Tlet .....                                                                        | 42 |
| Figure 7. Levé topographique de la parcelle non nivelée.....                                                                              | 44 |
| Figure 8. Répartition des différentes mailles de la parcelle non nivelée par tranche d'altitude .....                                     | 44 |
| Figure 9. Pourcentages cumulés des mailles par tranches d'altitude .....                                                                  | 45 |
| Figure 10. Dispositif de mesure des eaux de ruissellement de la parcelle nivelée disposant de raies (Chaumont <i>et al.</i> , 1999) ..... | 54 |
| Figure 11. Capteur TDR.....                                                                                                               | 56 |
| Figure 12. ET <sub>0</sub> Penman Monteith et pluviométrie cumulée à la station de Souk Tlet.....                                         | 62 |
| Figure 13. Chronique de ruissellement enregistré durant le mois de mars 2005 .....                                                        | 64 |
| Figure 14. Evolution du ruissellement instantané et cumulé en fonction des précipitations au cours de la campagne : 2004/05 .....         | 65 |
| Figure 15. Evolution du ruissellement instantané et cumulé en fonction des précipitations au cours de la campagne : 2005/06 .....         | 66 |
| Figure 16. Evolution des précipitations et de l'évapotranspiration durant le cycle de la betterave à sucre .....                          | 68 |
| Figure 17. Evolution du stock sur la profondeur de 1.4 m durant la campagne 2005/06 .....                                                 | 69 |
| Figure 18. Evolution du niveau de la nappe pour les 3 parcelles durant la saison 2005/06.....                                             | 70 |
| Figure 19. Evolution de l'humidité volumique mesurée par TDR à 10 cm de profondeur de janvier à mars 2005 .....                           | 71 |
| Figure 20. Evolution de la tension au niveau des 20 premiers cm suite à l'épisode pluvieux de mars 2005 .....                             | 72 |
| Figure 21. Evolution du LAI au cours de la saison 2003/2004 pour la parcelle non nivelée ..                                               | 75 |
| Figure 22. Evolution de la longueur du pivot pour les 3 parcelles et pour les 3 campagnes ...                                             | 76 |

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 23. Rendement racines (T/Ha) des différentes parcelles pour les campagnes 2003/04 à 2005/06 (traitements irrigués) .....                                                                    | 77  |
| Figure 24. Rendement racines (T/Ha) des différentes parcelles pour les campagnes 2003/04 à 2004/05 (Traitements non irrigués).....                                                                 | 77  |
| Figure 25. Richesse saccharine des différentes parcelles sous irrigation.....                                                                                                                      | 82  |
| Figure 26. Richesse saccharine des différentes parcelles non irriguées.....                                                                                                                        | 82  |
| Figure 27. Rendements en sucre brut des différentes parcelles sous la conduite à l'ETM.....                                                                                                        | 84  |
| Figure 28. Evolution de la germination des graines de betterave à sucre suite à des submersions .....                                                                                              | 87  |
| Figure 29. Evolution du pourcentage de plantules asphyxiées suite à la submersion.....                                                                                                             | 88  |
| Figure 30. Overview of the infiltration-runoff process at the scale of an elementary sub-plot .....                                                                                                | 100 |
| Figure 31. Overview of the plot during the winter period .....                                                                                                                                     | 101 |
| Figure 32. Calibration of $\lambda_c$ and $K_s$ on the median furrow for the 3 <sup>rd</sup> irrigation event (a) and validation on the 6 <sup>th</sup> irrigation event (b) of 2005 .....         | 108 |
| Figure 33. Evolution of volumetric water content measured by TDR (averaged values of the two sites) from 03/03 at 0 h AM to 03/06 at 3.00 AM in 2005.....                                          | 109 |
| Figure 34. Graphical calibration of $\beta$ involved in Equation (9) from the runoff event of March the 4 <sup>th</sup> in 2005.....                                                               | 110 |
| Figure 35. Model calibration on the event of March 2005 ( $K_s = 0.2$ cm/h, $n = 0.2$ , $\theta_i = 0.43$ ; $CE = 0.965$ ). Measured rainfall on a 15 min time step is converted here in mm/h..... | 111 |
| Figure 36. Model verification on the event of January 2006: ( $K_s = 0.2$ cm/h ; $n = 0.2$ , $\theta_i = 0.43$ ; $CE = 0.889$ ) .....                                                              | 112 |
| Figure 37. Model verification on the event of November 2004 ( $\theta_i = 0.40$ ; $CE = 0.829$ ) .....                                                                                             | 112 |
| Figure 38. Model verification on the event of March 2006 ( $\theta_i = 0.38$ ; $CE = 0.501$ ).....                                                                                                 | 113 |
| Figure 39. Model verification on the event of February 2006 ( $\theta_i = 0.42$ ; $CE = -1.1$ ) .....                                                                                              | 113 |
| Figure 40. Measured and simulated runoff amount for the different rainfall events shown in Figures 35-39.....                                                                                      | 114 |
| Figure 41. Sensitivity analysis of the model parameters on the event of March 2005 (a): $\beta$ (b) : $K_s$ , (c): $h_f$ , (d): $n$ . .....                                                        | 115 |
| Figure 42. Runoff event generated by a synthetic hyetograph (return period = 1 year) for different initial soil water contents.....                                                                | 117 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 43. Adoption d'un pas de temps de 5 mn et simulation événement March 2006 ( $\theta_i = 0.38$ ; $CE = 0.65$ ) .....                                                                                                                                              | 119 |
| Figure 44. Représentation schématique du modèle SOFIP .....                                                                                                                                                                                                             | 124 |
| Figure 45. Schéma de fonctionnement du module sol de PILOTE dans sa version classique .....                                                                                                                                                                             | 129 |
| Figure 46. (a) Calibration (année 2006) et (b) Validation (2005) du LAI de la betterave à sucre dans le Gharb [ $\alpha_1 = 1.5$ ; $\beta = 0.6$ ; $\alpha_2 = 3.4$ ; $T_{mat} = 1800^\circ$ ; $T_f = 1050^\circ$ ; $T_{s1} = 850^\circ$ ; $T_{s2} = 1500^\circ$ ]..... | 137 |
| Figure 47. Simulation du bilan hydrique sur P1 en 2005 ( $CE = 0.82$ , $RMSE = 15$ mm) .....                                                                                                                                                                            | 138 |
| Figure 48. Calage (a : irrigation n°3) et validation (b : irrigation n°6) des paramètres moyens $\overline{\lambda_c}$ et $\overline{K_s}$ du modèle SOFIP. ....                                                                                                        | 141 |
| Figure 49. Validation de SOFIP sur l'avancement de la raie médiane : irrigation N°4.....                                                                                                                                                                                | 142 |
| Figure 50. Simulation du bilan hydrique sur une placette amont de P3 en 2005 ( $CE = 0.832$ , $RMSE = 12$ mm) .....                                                                                                                                                     | 143 |
| Figure 51. Représentation schématique du module sol de la version adaptée de PILOTE à la submersion .....                                                                                                                                                               | 153 |
| Figure 52. Simulation du drainage saison 2004-2005 (a : validation) et saison 2005-2006 (b : calibration) .....                                                                                                                                                         | 158 |
| Figure 53. Simulation du drainage en 2004-2005 (a) et du bilan hydrique sur P3 (b) résultant de la simulation d'une double porosité .....                                                                                                                               | 158 |
| Figure 54. Simulation des rendements des deux campagnes 2004-2005 et 2005-2006.....                                                                                                                                                                                     | 162 |
| Figure 55. Impact des dates de semis sur la croissance racinaire (cas de la saison 2004-2005) .....                                                                                                                                                                     | 164 |
| Figure 56. Rendements simulés (a) et en parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement(b) et en parcelle non nivelée irriguée en aspersion.....                                                                                                                | 166 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1. Importance et caractéristiques des réseaux de drainage dans le Gharb.....                                                                                                                                     | 37  |
| Tableau 2. Caractéristiques des parcelles de la station de Souk Tlet.....                                                                                                                                                | 41  |
| Tableau 3. Bilan pluie -ET .....                                                                                                                                                                                         | 63  |
| Tableau 4. Coefficient du ruissellement de la parcelle nivelée dotée de raies .....                                                                                                                                      | 66  |
| Tableau 5. Le LAI de la betterave à sucre campagne 2003/04 .....                                                                                                                                                         | 74  |
| Tableau 6. Le LAI de la betterave à sucre campagne 2004/05 .....                                                                                                                                                         | 74  |
| Tableau 7. Le LAI de la betterave à sucre campagne 2005/06 .....                                                                                                                                                         | 74  |
| Tableau 8. Efficacités de l'irrigation selon différents façonnages de la parcelle.....                                                                                                                                   | 85  |
| Tableau 9. Efficacités de l'irrigation et précipitations selon différents façonnages de la<br>parcelle .....                                                                                                             | 85  |
| Tableau 10. Paramètres du modèle PILOTE pour la betterave à sucre au Gharb avec.....                                                                                                                                     | 140 |
| Tableau 11. Simulation pratique réelle / pratique améliorée (scénario 2004-2005) .....                                                                                                                                   | 145 |
| Tableau 12. Rendements moyens (T/ha) sur parcelle nivelée irriguée en gravitaire simulés<br>selon SOFIP (conduite non restrictive) sur une chronique de 11 années au Gharb pour<br>trois dates de semis différentes..... | 165 |
| Tableau 13. Rendements (T/ha) sur parcelle non nivelée irriguée en aspersion simulés en<br>parcelle non planée sur une chronique de 11 années au Gharb pour trois dates de semis<br>différentes.....                     | 166 |
| Tableau 14. Analyse de la productivité de l'eau en gravitaire modernisé .....                                                                                                                                            | 167 |

## Liste des abréviations

|               |                                                                                        |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| AGR           | : Administration du Génie Rural                                                        |
| AGROPARISTECH | : Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement                  |
| ASCE          | : American Society of Civil Engineering                                                |
| BAS           | : Betterave à sucre                                                                    |
| Cemagref      | : Centre de Recherche en Machinisme Agricole, en Génie Rural et Eaux et Forêts         |
| CDA           | : Centre de Développement Agricole                                                     |
| CTCS          | : Centre Technique des Cultures Sucrières                                              |
| ENGREF        | : Ecole Nationale du Génie Rural et Eaux et Forêts                                     |
| FAO           | : Food and Agriculture Organisation                                                    |
| IAV           | : Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II-Rabat Maroc                            |
| ITB           | : Institut Technique Français de la Betterave Industrielle                             |
| ORMVAG        | : Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb-Maroc                            |
| PTI           | : Première Tranche d'Irrigation                                                        |
| SAU           | : Surface Agricole Utile.                                                              |
| SCS           | : Soil Conservation Service                                                            |
| SEHA          | : Stations des Expérimentations Hydro-agricoles                                        |
| SIBAGHE       | : Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement |
| SIRMA         | : Systèmes IRrigués au Maghreb                                                         |
| STI           | : Seconde Tranche d'Irrigation                                                         |
| TTI           | : Troisième Tranche d'Irrigation                                                       |
| UMR-GEAU      | : Unité Mixte de Recherche Gestion de l'Eau Acteurs et Usages                          |

## Liste des symboles

|         |                                                                              |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|
| A       | : Section mouillée [ $L^2$ ]                                                 |
| $A_0$   | : Section mouillée en tête de raie [ $L^2$ ]                                 |
| C       | : Coefficient de ruissellement [-]                                           |
| CE      | : Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe [-]                             |
| $C_m$   | : Coefficient de mortalité des graines et des plantules de la BAS [-]        |
| Cordens | : Correction de densité                                                      |
| $C_p$   | : Coefficient de partage de l'évaporation et de la transpiration [-]         |
| $C_s$   | : Taux d'infiltration de base en [ $L/L/T$ ]                                 |
| CU      | : Coefficient d'Uniformité [-]                                               |
| $C_v$   | : Coefficient de variation [-]                                               |
| d1      | : Drainage du réservoir R1 vers R2 (modèle de culture Pilote) [L]            |
| d2      | : Drainage du réservoir R2 vers R3 (modèle de culture Pilote) [L]            |
| d3      | : Drainage du réservoir $R_3$ vers $R_4$ (modèle adapté à la submersion) [L] |
| D       | : Drainage [L]                                                               |
| densini | : Densité de semis initiale [-]                                              |
| Densr   | : Densité réelle [-]                                                         |
| dx      | : Pas d'espace dans la direction des x [L]                                   |
| dt      | : Pas de temps [T]                                                           |
| EA      | : Efficacité d'application [-]                                               |
| Esi     | : Evaporation du sol du réservoir i [ $LT^{-1}$ ]                            |
| $ET_0$  | : Evapotranspiration de référence [L]                                        |
| ETM     | : Evapotranspiration maximale [L]                                            |
| ETR     | : Evapotranspiration réelle [L]                                              |
| e       | : Espacement entre poquet [L]                                                |
| E       | : Ecartement des drains [L]                                                  |
| fs      | : Ecartement des raies [L]                                                   |
| h       | : Tension de l'eau du sol [L]                                                |
| hd      | : Charge au dessus des drains [L]                                            |
| $h_f$   | : Succion capillaire au front d'humectation paramètre de Green et Ampt [L]   |
| HIpot   | : Indice de récolte potentiel [-]                                            |
| hn      | : Niveau de la nappe [L]                                                     |
| i(t)    | : Infiltration instantanée [ $LT^{-1}$ ]                                     |

|                    |                                                                                                       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                  | : Pente d'un fossé [ $LL^{-1}$ ]                                                                      |
| $I_{(j)}$          | : Fraction de la radiation solaire interceptée [-]                                                    |
| $I^k$              | : Infiltration cumulée durant l'événement pluvieux k [L]                                              |
| $I_{rf}$           | : Infiltration cumulée depuis le commencement de l'événement pluvieux jusqu'à la saturation [L]       |
| $I_{rp}$           | : Précipitation cumulée depuis le commencement de l'épisode jusqu'à l'apparition de la submersion [L] |
| J                  | : Pente de la ligne d'énergie [ $LL^{-1}$ ]                                                           |
| K                  | : Coefficient de Manning Strickler                                                                    |
| $K_c$              | : Coefficient cultural [-]                                                                            |
| $K_{ru}$           | : fraction de la réserve facilement utilisable par rapport à la réserve utile [-]                     |
| $K_s$              | : Conductivité hydraulique à saturation [ $LT^{-1}$ ]                                                 |
| LAI                | : Leaf Area Index [ $L^2L^{-2}$ ]                                                                     |
| LAI <sub>max</sub> | : LAI maximal [ $L^2L^{-2}$ ]                                                                         |
| LAI <sub>moy</sub> | : LAI moyen [ $L^2L^{-2}$ ]                                                                           |
| LAI <sub>opt</sub> | : LAI optimal [ $L^2L^{-2}$ ]                                                                         |
| $L_f$              | : Profondeur du front d'humectation [L]                                                               |
| m                  | : Fruit des berges [-]                                                                                |
| n                  | : Coefficient de rugosité de Manning [ $TL^{-1/3}$ ] = 1/K                                            |
| N                  | : Nombre de raies [-]                                                                                 |
| P                  | : Périmètre mouillé [L]                                                                               |
| $P_c$              | : Pertes en colature [-]                                                                              |
| $p_g$              | : Paramètre de calage pour la mortalité des graines [-]                                               |
| $p_p$              | : Paramètre de calage pour la mortalité des graines [-]                                               |
| $P_s$              | : Profondeur du réservoir superficiel du modèle Pilote [L]                                            |
| $P(t)$             | : Précipitations [L]                                                                                  |
| $P_x$              | : Profondeur maximale d'enracinement [L]                                                              |
| Q                  | : Débit [ $L^3/T$ ]                                                                                   |
| $Q_d$              | : Débit de drainage [L]                                                                               |
| q                  | : Taux d'infiltration instantané [ $LT^{-1}$ ]                                                        |
| $q_c$              | : Capacité d'infiltration [ $LT^{-1}$ ]                                                               |
| $q_r$              | : Intensité de la précipitation [ $LT^{-1}$ ]                                                         |
| r                  | : Ruissellement provenant de l'inter raies [ $L^2T^{-1}$ ]                                            |

|             |                                                                             |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| R           | : Taux hydraulique moyen [ $LT^{-1}$ ]                                      |
| R1          | : Réservoir n°1 du modèle Pilote                                            |
| R2          | : Réservoir n°2 du modèle Pilote                                            |
| R3          | : Réservoir n°3 du modèle Pilote                                            |
| $r_g$       | : Paramètre de calage pour la mortalité des graines [-]                     |
| $r_p$       | : Paramètre de calage pour la mortalité des plantules [-]                   |
| $R_H$       | : Rayon hydraulique [L]                                                     |
| $Rs(t)$     | : Valeur seuil de la teneur en eau du réservoir $R_2$ modèle de culture [L] |
| $R(t)$      | : Ruissellement à l'instant t [L]                                           |
| RU          | : Réserve Utile [ $LL^{-1}$ ]                                               |
| RFU         | : Réserve Facilement Utilisable [L]                                         |
| RUE         | : Efficience de conversion [ $gMJ^{-1}$ ]                                   |
| $S(j)$      | : Rayonnement solaire incident [ $J L^{-2}$ ]                               |
| $S_0$       | : Pente de la raie [ $LL^{-1}$ ]                                            |
| SomT        | : Cumul de température depuis le semis de la BAS [ $^{\circ}C$ ]            |
| $S_m$       | : Section mouillée [ $L^2$ ]                                                |
| t           | : Temps courant [T]                                                         |
| $T^{\circ}$ | : Température [ $^{\circ}C$ ]                                               |
| $ta(x)$     | : Temps d'avancement du front d'eau à l'abscisse x [T]                      |
| $T_b$       | : Température de base [ $^{\circ}C$ ]                                       |
| $t_B^k$     | : Début du $k^{ème}$ événement pluvieux [T]                                 |
| $t_E^k$     | : Fin du $k^{ème}$ événement pluvieux [T]                                   |
| $T_{crit}$  | : Température critique [ $^{\circ}C$ ]                                      |
| $T_f$       | : Température de floraison [ $^{\circ}C$ ]                                  |
| TL          | : Temps d'avancement du front d'eau au niveau de la raie médiane [T]        |
| tm          | : Température seuil pour atteindre le LAI maximal [ $^{\circ}C$ ]           |
| Tmat        | : Température pour atteindre la maturité [ $^{\circ}C$ ]                    |
| Tmoy        | : Température moyenne [ $^{\circ}C$ ]                                       |
| tp          | : Temps d'apparition de la submersion [T]                                   |
| $T_{pi}$    | : Transpiration réelle du réservoir i [ $LT^{-1}$ ]                         |
| $T_{pm}$    | : Transpiration maximale [ $LT^{-1}$ ]                                      |
| $tr(x)$     | : Temps de récession à l'abscisse x [T]                                     |
| $T_{s1}$    | : Température de début de forte sensibilité au stress [ $^{\circ}C$ ]       |

|                |                                                                                                            |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_{s2}$       | : Température de fin de forte sensibilité au stress [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                 |
| $T_{sg}$       | : Température seuil pour les graines [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                                |
| $TT(j)$        | : Indice thermique [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                                                  |
| $V_r$          | : Vitesse de croissance racinaire [ $\text{LT}^{-1}$ ]                                                     |
| $WAD$          | : Hauteur d'eau appliquée [L]                                                                              |
| $x(t)$         | : Position du front d'avancement à l'instant $t$ [L]                                                       |
| $Y_a$          | : Rendement réel obtenu                                                                                    |
| $Y_m$          | : Rendement obtenu en conditions non restrictives                                                          |
| $Z_r$          | : Profondeur de référence du sol dans le modèle de ruissellement [L]                                       |
| $Z_d$          | : Côte moyenne des drains [L]                                                                              |
| $\alpha$       | : Paramètres de forme de la fonctionnelle du LAI [-]                                                       |
| $\beta$        | : Paramètres de forme de la fonctionnelle du LAI [-]                                                       |
| $\gamma$       | : Paramètres de forme de la fonctionnelle du LAI [-]                                                       |
| $\theta_0$     | : Teneur en eau volumique initiale du sol [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                                   |
| $\theta_B^k$   | : Humidité volumique du sol au début du $k^{\text{ème}}$ événement pluvieux [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ] |
| $\theta_E^k$   | : Humidité volumique du sol à la fin du $k^{\text{ème}}$ événement pluvieux [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ] |
| $\theta_i$     | : Teneur en eau volumique du sol [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                                            |
| $\theta_{fc}$  | : Teneur en eau du sol à la capacité au champ [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                               |
| $\theta_{pf}$  | : Teneur en eau du sol au point de flétrissement [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                            |
| $\theta_{R2}$  | : Fonction témoignant du remplissage du réservoir R2 [-]                                                   |
| $\theta_s$     | : Teneur en eau à saturation [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                                                |
| $\Delta\theta$ | : Déficit de saturation [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ]                                                     |
| $\Theta$       | : Teneur en eau sous le front racinaire [L]                                                                |
| $B$            | : Paramètre régissant le drainage rapide du sol cf modèle de ruissellement [-]                             |
| $\Lambda$      | : Coefficient d'aversion au stress [-]                                                                     |
| $\lambda_c$    | : Longueur capillaire [L]                                                                                  |
| $T$            | : Durée de la pluie cf modèle de ruissellement [T]                                                         |
| $\chi$         | : Facteur empirique permettant d'augmenter ou de réduire l'effet macropore [-]                             |

## Chapitre I. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

L'accroissement de la population mondiale et la raréfaction des ressources hydriques imposent une utilisation rationnelle de ces dernières d'autant plus que l'effet du changement climatique est de plus en plus perceptible. L'agriculture irriguée contribue pour plus d'un tiers à l'alimentation de la population mondiale (Lesaffre, 2003). Elle continuera nécessairement à jouer un rôle déterminant pour longtemps.

Des efforts considérables ont été consentis par plusieurs pays à travers le monde pour la réalisation des aménagements hydro-agricoles et la mise en place de l'agriculture irriguée. Celle-ci contribue à 40% de la production agricole avec 17% de la SAU à l'échelle mondiale. La croissance agricole au cours des dernières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle a été spectaculaire. Entre 1980 et 2000, la part agricole dans les économies des pays du Sud a augmenté de 2% par an quand leur population n'augmentait que de 1,6%, avec pour conséquence majeure une réduction des prix des denrées premières. Bien que la surface totale irriguée dans le monde soit en augmentation, la surface irriguée par habitant est en diminution en raison de la croissance rapide de la population (Price, 2001).

Setter *et al.* (2002) notent que 10% de la surface du globe est soumise à des contraintes sévères de drainage. L'hydromorphie entrave le développement agricole à travers le monde. Elle correspond à un engorgement temporaire ou permanent des sols. Les engorgements constituent une contrainte considérable pour la production agricole (Penel, 1988 ; Gupta *et al.*, 1992). L'excès d'eau peut résulter soit de la remontée d'une nappe phréatique, l'anthropisation par le recours à l'irrigation ou l'aplanissement des sols et aussi par un manque d'infiltration des eaux de pluies. Les conséquences d'un excès d'eau peuvent être importantes et réduire tous les efforts entrepris antérieurement pour l'amélioration des conditions d'exploitations.

(Reboul, 1985 ; Hodgson *et al.*, 1989) notent que les engorgements en eau des sols non seulement limitent l'accès de la main d'œuvre agricole aux champs pour la réalisation des trains techniques culturaux mais aussi réduisent les rendements. Ces réductions ont été relevées sur un grand nombre d'espèces cultivées : le blé (Belford, 1981; Cavazza et Rossi Pise, 1988; Meyer et Barrs, 1988; Musgrave, 1994 ; Rebiere, 1996), le maïs (Ahmad et Kanvar, 1991; Carter *et al.*, 1990; Vantoai *et al.*, 1988; Yihua *et al.*, 1989), le soja (Cooper *et al.*, 1991; Heatherly et Pringle, 1991; Sallam et Scott, 1987; Scott *et al.*, 1990), le coton (Kandil et Willarson, 1992), l'orge (Hodgson *et al.*, 1989; Singh *et al.*, 1986), l'avoine (Cannell *et al.*, 1985), la canne à sucre (Carter et Camp, 1994; Gayle *et al.*, 1987; Chabot *et*

*al.*, 2002 ), la betterave à sucre (Richard *et al.*, 1988), le ray-grass (Stout et Schnabel, 1994), et le trèfle (Aschi Smiti *et al.*, 2003). Cependant, la tolérance à l'eau varie fortement d'une espèce à l'autre. L'élimination de l'excès d'eau reste par conséquent une nécessité majeure pour améliorer les conditions de développement et de croissance des cultures.

Boiffin *et al.*, (2004) considèrent l'amélioration de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques comme un enjeu majeur pour la recherche agronomique, à travers la maîtrise des impacts environnementaux de l'agriculture, la capacité d'adaptation et d'évolution des systèmes de production, et la connaissance et le diagnostic des milieux. Dans les régions arides et semi-arides, le drainage agricole s'est développé dans les périmètres irrigués pour permettre la mise en valeur de terres agricoles présentant des risques d'excès d'eau dus principalement à des remontées de la nappe phréatique d'une part, et des risques de salinisation d'autre part. De ce fait, l'agriculture mondiale se trouve aujourd'hui menacée de perdre de grandes superficies de terres agricoles par engorgement et salinisation des sols. Ce phénomène risque de s'accroître sous l'effet de la remontée du niveau des océans, conséquence même du changement climatique.

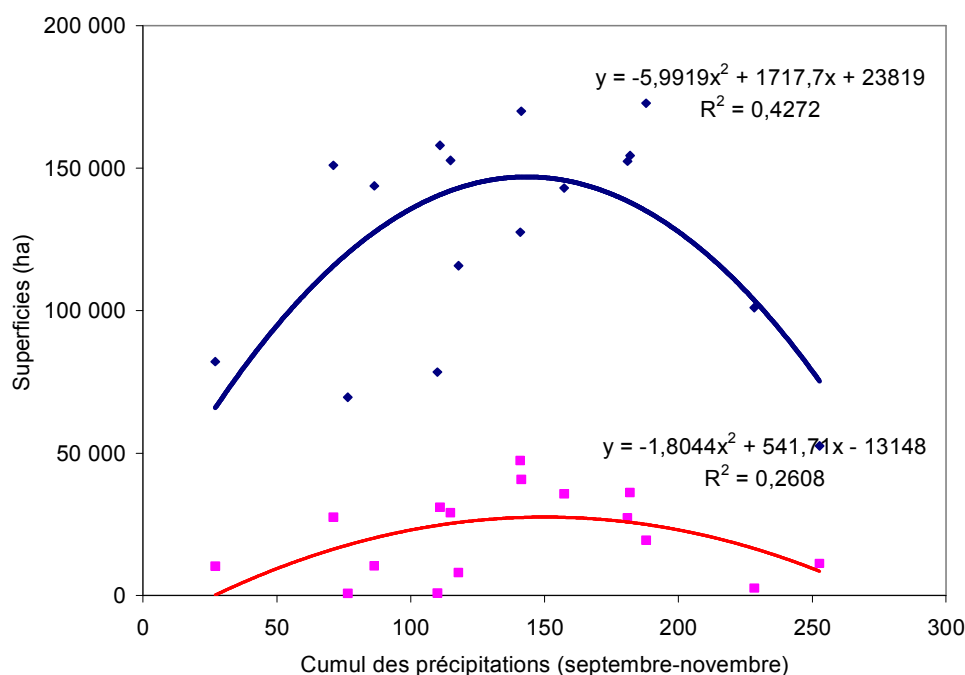
A l'échelle mondiale, la superficie des sols équipés d'un drainage de surface s'élève à 120 Mha environ (Field, 1990). Le drainage souterrain est utilisé sur environ 50 Mha (Lesaffre *et al.*, 1992) cité par Zimmer *et al.* (2006).. Pendant longtemps, la notion de drainage a été liée à l'évacuation des excès d'eau par des écoulements souterrains vers des tuyaux enterrés. Les écoulements de surface ne sont considérés qu'à partir du point aval de la parcelle agricole lorsque les eaux de drainage souterrain sont évacuées dans les réseaux d'assainissement. Peu d'importance est accordée au drainage de surface à l'échelle de la parcelle agricole (évacuation des excès d'eau par ruissellement).

L'analyse du réseau de drainage est complexe. En dernier ressort, c'est la comparaison des comportements agronomiques (et de leurs conséquences économiques) de terres, drainées selon différents modes de drainage et non drainées, qui permettra de décider si le drainage - et quel drainage- est un investissement rentable Lesaffre (1988). Dans les périmètres irrigués sujets à des précipitations intenses ou à des sols lourds et peu perméables, les systèmes de drainage de surface ont pour premier objectif l'élimination des eaux de ruissellement. Zimmer (2001) a montré que la part des précipitations évacuée par le drainage de surface augmente avec l'augmentation de l'écartement des drains (enterrés) et elle est maximale en absence de drainage souterrain.

La plaine du Gharb au Maroc et notamment la partie centrale dominée par les sols à texture argileuse est l'exemple typique de périmètre irrigué qui souffre du problème de drainage en hiver. Le Gharb, située au nord ouest du Maroc, s'étend sur une superficie totale d'environ 616.000 ha avec un potentiel irrigable identifié par le projet Sebou de 250.000 ha (Perennes, 1993). La mise en valeur de la plaine est pénalisée par l'excès d'eau hivernal compte tenu de la nature subhumide de son climat et de la nature argileuse de ses sols conjuguée à une pente très faible. (Debbarh *et al.*, 1991) soulignaient que sur un potentiel irrigable au Maroc de 1.600.000 ha ; 350.000 ha seraient soumis aux risques d'excès d'eau ou de salinisation dont 200.000 ha concernent la plaine du Gharb.

En effet, le Gharb est l'une des plaines les plus pluvieuses du Maroc. La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 570 mm, avec des fluctuations interannuelles très importantes pouvant varier de 240 mm à 800 mm. Plus de 80% des précipitations ont lieu entre les mois de novembre et mars, créant des stagnations et des engorgements. Ces périodes coïncident avec la mise en place des cultures où avec les premiers stades de végétation. Les rendements des cultures se trouvent affectés selon le stade où le stress dû à l'excès d'eau a été subi (Meyer and Bans, 1988 ; Mukhtar *et al.*, 1990 ; Scott *et al.*, 1990). Il convient aussi de noter que la répartition saisonnière des pluies ne joue pas seulement sur l'alimentation hydrique mais aussi sur les conditions de la réalisation des techniques culturales. En effet, de grandes surfaces restent incultes soit par asphyxie des cultures mises en place soit par l'impraticabilité du sol en cette période engendrant un retard dans les semailles.

La Figure 1 montre l'évolution des superficies travaillées et semées en fonction des hauteurs des précipitations enregistrées au niveau du périmètre du Gharb, durant la période s'étalant de septembre à novembre. Il ressort que les conditions de sécheresse ou de fortes précipitations ont un effet négatif sur l'étendue des superficies travaillées et semées. Concernant la sécheresse, le Gharb dispose d'un fort potentiel en matière de ressources en eaux pour le recours à l'irrigation aussi bien en périmètre collectif gérés par l'Etat que pour les zones où l'irrigation privée s'est développée et qui connaît un essor important ces dernières années. Par contre, pour les fortes précipitations et les excès d'eaux engendrés, le problème reste posé.



**Figure 1.** Evolution des superficies travaillées et semées en fonctions du cumul des précipitations (septembre-novembre)

Actuellement, la superficie équipée en grande hydraulique porte sur le système gravitaire (97 000 ha), le système aspersion (20 000 ha) et le système basse pression où l'eau est acheminée depuis le point de mobilisation jusqu'à la parcelle par des conduites enterrées et utilisée gravitairement (3 000 ha). Pour le gravitaire et la basse pression, le nivellement des parcelles, une des opérations d'aménagement, a été effectué selon la méthode des touches de piano. Pour le système aspersion, introduit pour des raisons de mécanisation de la récolte de la canne à sucre en offrant des longueurs d'attaque plus importantes aux récolteuses, l'absence du nivellement était considérée comme un avantage. Ce système permettait aussi, d'accélérer le rythme d'équipement pour atteindre le 1.000.000 ha que le Maroc s'est fixé comme objectif à atteindre à l'horizon 2 000 (Lahlou *et al.*, 1989). Les parcelles aspersionnelles connaissent généralement des micro-dépressions dues au fait que le nivellement n'a pas été réalisé. Les différences d'altitudes peuvent atteindre 80 cm.

L'irrigation gravitaire est la plus ancienne des techniques d'irrigation adoptées dans le monde et occupe environ 80% des superficies irriguées à l'échelle mondiale et ce même dans les pays industrialisés tel que les USA avec 70% (Mailhol, 2001). Cette situation résulte du fait que cette technique qui n'est pas très complexe à mettre en œuvre et moins exigeante en terme de d'investissement à l'échelle de la parcelle en la comparant à l'irrigation par aspersion ou localisée. Un intérêt majeur du gravitaire pour les agriculteurs du Gharb vis-à-vis des

techniques comme l'aspersion par exemple est qu'elle permet une réduction considérable des dépenses énergétiques. En outre comme pour toute technique ancienne, le "savoir faire" a pu se transmettre de génération à génération. Les pratiques adoptées à la parcelle actuellement dans le Gharb sont la raie longue et la Robta.

Selon Lahlou et Ait Kadi (1983) cités dans le Projet SID (1986) toutes les terres équipées ne sont pas irriguées correctement, avec les techniques adéquates recommandées, aboutissant ainsi à une détérioration rapide de l'outil mis en place. Un certain pourcentage de ces terres reste non mis en valeur ou est exploité en "bour". Une des principales causes de cette mauvaise exploitation de l'aménagement est l'état du nivellement. Les imperfections observées peuvent être dues à une mauvaise exécution des travaux d'aménagement interne des propriétés mais le plus souvent, elles ont comme origine une dégradation du nivellement initial suite :

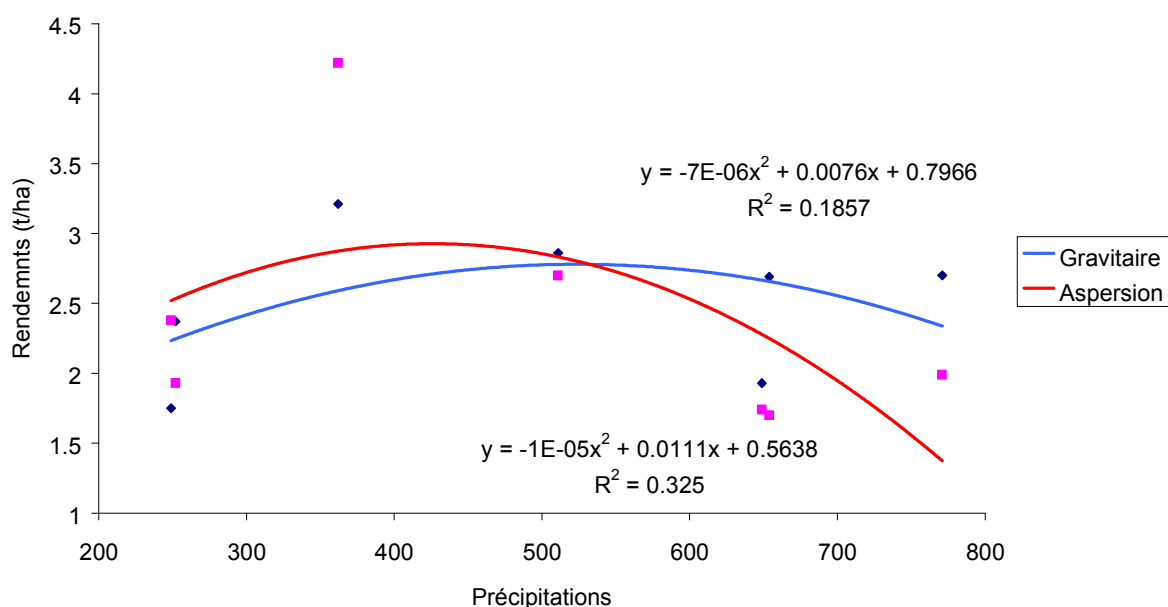
- au tassement hétérogène de la surface nivelée, les zones d'apport de terre se retassent plus que les zones "rabotées";
- à l'utilisation d'outils de préparation du sol détruisant le nivellement ; la charrue polysoc non réversible étant le principal responsable de ce type de dégradation, en plus de la charrue à disques et du cover-crop ;
- à la pratique d'irrigation adoptée par les agriculteurs.

Par ailleurs, il est à noter que les pratiques d'irrigation utilisées par les agriculteurs sont non seulement inefficaces sur le plan agronomique, mais favorisent les stagnations d'eau hivernales (Taky *et al.*, 2005). L'une des causes majeures réside dans le non entretien du nivellement dans les zones gravitaires. Ce problème est par ailleurs généralisé dans d'autres périmètres de grande hydraulique du Maroc. L'absence du nivellement des parcelles aspersives entraîne des stagnations d'eau au niveau des dépressions topographiques. En effet, l'analyse des rendements des céréales (une des principales cultures d'automne) à l'échelle de toute la zone équipée du périmètre du Gharb en système gravitaire (nivelé lors de l'aménagement) et aspersif (non nivelé) obtenus en fonction des précipitations recueillies à l'échelle de la campagne au niveau de la plaine du Gharb (Figure 2) a montré que:

- Les rendements restent faibles aussi bien pour l'aspersion que pour le gravitaire ;
- Les rendements augmentent jusqu'à un optimum et décroissent ensuite ;
- Les rendements sont relativement meilleurs pour le système aspersif lorsque les hauteurs de précipitations sont faibles ce qui pourrait s'expliquer par le fait que l'absence du nivellement pourrait contribuer à maintenir l'eau sur la parcelle. Cela

pourrait être favorable pour les phases ultérieures de la culture ou du fait des apports contrôlés lors des irrigations. Compte tenu du fait que les systèmes d'irrigation ne sont pas mis en place lors des semailles, leur installation lors de la saison d'irrigation est souvent destructive ou en cas d'irrigation par submersion les apports sont pléthoriques.

- Au delà de l'optimum (hauteurs importantes d'eau recueillies par les précipitations) les rendements sont relativement meilleurs pour le système gravitaire, ce qui pourrait être expliqué par la capacité d'évacuation des excédents d'eau (présence de pente).

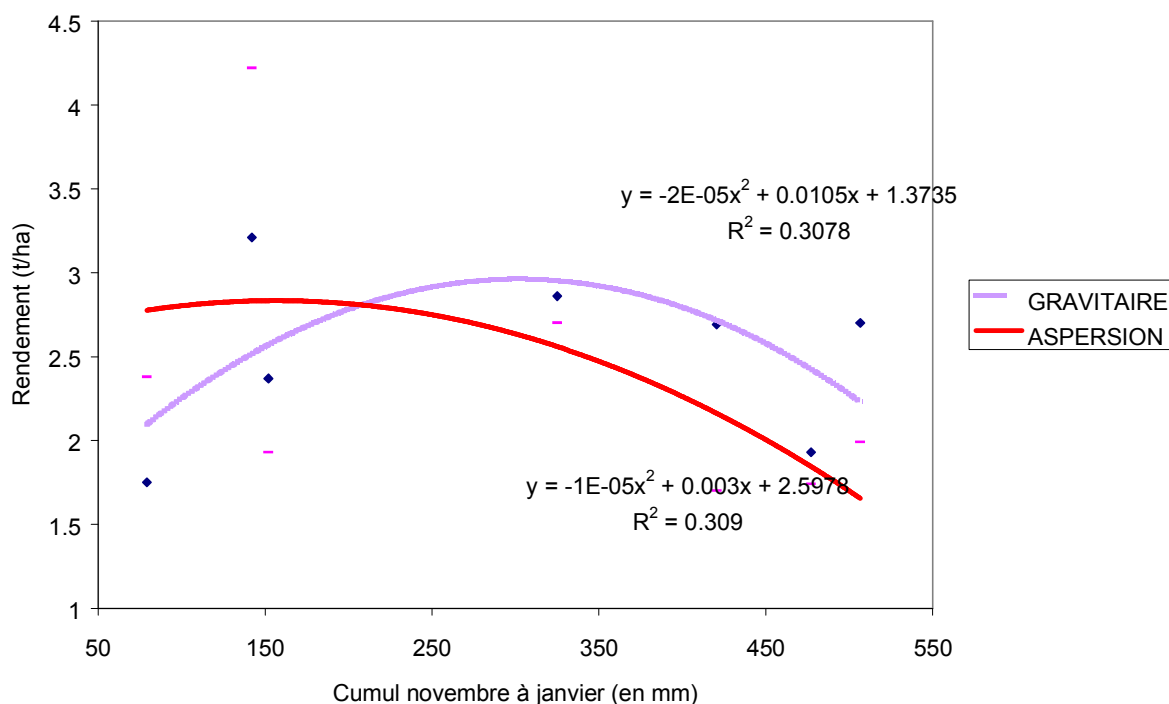


**Figure 2.** Evolution des rendements des céréales en fonctions des précipitations

Les meilleures ajustements entre les rendements moyens à l'échelle de l'ensemble des secteurs aspersif et gravitaire et les précipitations mensuelles (mois/mois ou groupe de mois) sont obtenus pour les périodes (octobre - janvier)

Figure 3. Cela pourrait s'expliquer par le fait que cette période coïncide avec l'installation des cultures d'hiver et que les céréales restent sensibles à l'excès d'eau durant la phase de germination-levée. EL Amraoui (1998) et Bentiss et Farhaoui (1999) avaient relevé la pertinence de l'indice des précipitations des mois de novembre à janvier d'une année donnée par rapport à la valeur moyenne des précipitations de la période considérée vis à vis du

rendement. Cet indice a été déterminé pour juger les performances agronomiques des réseaux de drainage (Zimmer *et al.*, 1999).



**Figure 3.** Evolution des rendements des céréales en fonction du cumul des précipitations de novembre à janvier

Les critères de conception de l'ensemble des réseaux de drainage dans la plaine du Gharb ont été établis en l'absence de références expérimentales locales. Celles-ci n'ont été acquises que pendant les années 90 dans le cadre d'un programme scientifique de coopération en hydraulique agricole dont le but était l'acquisition de références locales sur le drainage agricole et sur l'irrigation dans la plaine du Gharb. Ce programme a fait l'objet d'une convention entre l'Office de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG) et le Cemagref à laquelle s'est associée l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV HII). Cette convention était co-financée par l'Agence Française de Développement et par l'ORMVAG.

Ce programme a mis en évidence le fait que le drainage souterrain a été privilégié vis-à-vis du drainage de surface, ce qui a engendré des surcoûts importants de réalisation et d'entretien. La démarche utilisée pour concevoir les réseaux a de plus reposé sur une approche ambiguë en ce qui concerne la définition des critères de conception. En particulier la saison critique de drainage qu'il convient de considérer, soit hivernale, soit estivale sous irrigation. Cette approche a conduit à la mise en place de réseaux profonds (1,6 m environ). Sur ce point, les résultats acquis au sein de la SEHA de Souk Tlet réalisée dans le cadre de la convention ont

montré que le raisonnement du drainage dans le Gharb était avant tout un problème d'évacuation des eaux hivernales (Bouarfa *et al.*, 2002). Une conséquence essentielle doit être déduite de ce constat : un drainage souterrain minimal doit être prévu pour contrôler le niveau de la nappe et lutter contre la salinité tandis que toute son importance doit être redonnée au drainage de surface pour l'évacuation des excès d'eau (Debbarh *et al.*, 1998).

En hiver, les pluies provoquent l'engorgement des sols et l'apparition des excès d'eau superficiels portant préjudice aux cultures installées en automne et en hiver. On assiste également à des remontées de la nappe salée (environ 10 g/l à la région de Souk Tlet, Debbarh *et al.* (1999)) favorisant l'accumulation des sels dans les horizons superficiels du sol. En été, les irrigations (ayant une salinité de 1 g/l), nécessaires pour sécuriser les rendements des cultures, peuvent également entraîner des remontées de la nappe, contribuant à la salinisation de la zone non saturée des sols.

Etant donné la complexité des engorgements des sols dans la plaine du Gharb, il y'a lieu de poser des questions sur (i) l'importance à accorder à la prévention de la salinité et au contrôle de la nappe (ii) l'impact des excès d'eau sur les cultures d'automne et d'hiver et (iii) le poids à accorder au drainage de surface pour le ruissellement hivernal.

Concernant la réponse à la première interrogation, le suivi expérimental réalisé durant une dizaine d'années dans le Gharb n'a relevé aucun signe de salinisation de la zone racinaire même en présence de nappe salée peu profonde (Debbarh *et al.*, 1999 ; Zeraouli, 1999 ; Bouarfa *et al.*, 2002). Les recommandations de l'Atelier International de drainage dans le Gharb font ressortir que la salinité estivale est en effet un risque moindre que les engorgements hivernaux. Atif *et al.*, (1999). On peut supposer que dans ce cas le drainage profond joue un rôle fondamental pour le maintien de la nappe phréatique et l'équilibre des sels au niveau de la couche racinaire.

Dans le présent travail, nous avons essayé de chercher une réponse à la seconde question relative à l'impact des excédents d'eau de surface et l'évaluation des performances du drainage superficiel. Les suivis expérimentaux du drainage au niveau de la station de Souk Tlet ont montré, en effet, que le drainage de surface participe à plus de 40 % de l'évacuation des eaux (Hammani, 2002 ; Bouarfa *et al.*, 2002). Parallèlement, au volet expérimental sur le drainage agricole, le volet sur l'irrigation a démontré l'intérêt des systèmes gravitaires modernisés (irrigation à la raie longue) dans un contexte où les coûts énergétiques de

l'irrigation par aspersion représentent une contrainte nationale de plus en plus lourde (Mailhol *et al.*, 1999).

Le travail que nous avons conduit vise à démontrer que le façonnage de la surface du sol par le nivellement et la mise en place des raies présentent non seulement un intérêt en période estivale, mais également vis-à-vis du drainage de surface en période hivernale. Ceci sous entend l'hypothèse que les micro-depressions, résultantes de l'absence du nivellement sont le siège de stagnations d'eau et sont déterminantes pour le rendement. Deux objectifs sont assignés à cet travail : (i) évaluation des performances hydrauliques et agronomique du drainage de surface et (ii) évaluation de l'impact du déficit de ruissellement sur la production agricole. La démarche retenue pour ce travail est de deux natures : (i) la première basée sur des expérimentations en milieu expérimental (champs et milieu contrôlé) et chez les agriculteurs et (ii) la deuxième portant sur la modélisation, permettant d'extrapoler à différentes années climatiques, du ruissellement hivernal et de l'impact de excès d'eau sur la production agricole. La comparaison concernera 3 parcelles agricoles présentant 3 modes de drainage de surface qui diffèrent selon le modelé de surface : (i) parcelle nivelée dotée d'une pente dans le sens de la longueur et de raies longues (ii) parcelle nivelée dans le sens de la longueur et sans raies et (iii) parcelle non nivelée et sans raies.

Le volet expérimental, objet du chapitre II, porte sur l'évaluation des performances hydrauliques et hydrologiques du drainage de surface par un système de raies d'une part et, d'autre part, sur l'analyse des performances agronomiques des trois types de modelés de surface (nivelée avec raies, nivelée sans raies et non nivelée). La culture de betterave à sucre est retenue comme support des expérimentations, du fait qu'elle joue un rôle important dans l'économie nationale marocaine et occupe annuellement environ 30 000 ha au Maroc. De plus, elle est l'une des principales cultures d'automne et d'hiver qui souffrent des problèmes d'engorgement liés aux excédents d'eau hivernaux. Notons que ce type cultures d'automne représente 94% des assolements pratiqués au Maroc.

Le travail expérimental a eu lieu à la station expérimentale de Souk Tlet de l'ORMVA du Gharb (Maroc) à environ 100 Km au Nord de Rabat. Le premier volet du travail consiste en l'évaluation des performances du drainage de surface par le recours à la mise en place des raies après la réalisation du nivellement. Le deuxième volet concerne l'évaluation du gain de rendement des cultures que génère ce façonnage en comparaison avec les parcelles non nivelées. L'échelle d'observation est la parcelle agricole drainée du point spatial et la campagne agricole de point de vue temporel.

Concernant la modélisation, qui fera l'objet du chapitre III, étant donné que les expérimentations n'ont porté que sur 3 campagnes, celle-ci nous permettra de mieux appréhender le rôle et l'intérêt du drainage de surface par le biais du nivellement et de la mise en place des raies pour l'évacuation des excédents d'eau. A contrario elle nous permettra d'évaluer l'impact de la submersion sur la betterave sucrière. Notre échelle d'analyse est donc la campagne agricole. Comme, il a été indiqué ci-dessus, la période hivernale reste sujette aux excédents d'eaux qui peuvent impacter les rendements et le recours à l'irrigation, est impératif pour sécuriser les rendements dans le Gharb à partir du printemps. Une modélisation spécifique à la technique gravitaire sera mise en œuvre afin de proposer des pratiques d'irrigation efficaces du point de vue hydraulique et agronomiques. Ce volet modélisation traitera donc des trois systèmes précédemment évoqués.

Enfin, le chapitre IV sera centré sur les résultats de la modélisation et l'analyse des performances agronomique du nivellement et de la mise en place des raies. Une application à une série climatique nous permettra par ailleurs d'analyser l'intérêt du nivellement et de la pratique de l'irrigation à la raie modernisée.

## **Chapitre II. RUISSELLEMENT ET SUBMERSIONS LOCALES ASPECTS EXPERIMENTAUX**

### **II. 1. Introduction**

La mise en valeur de la plaine du Gharb est pénalisée par l'excès d'eau hivernal compte tenu de son climat subhumide et de la nature argileuse de ses sols conjuguée à une pente très faible. En hiver, les pluies provoquent l'engorgement des sols et l'apparition des excès d'eau superficiels portant préjudice aux cultures installées en automne et en hiver. Le travail que nous avons conduit dans le cadre de la présente étude vise à démontrer que la raie longue assujettie à la réalisation du nivellement présente non seulement un intérêt pour l'irrigation en période estivale, mais également vis-à-vis du drainage de surface en période hivernale.

Des expérimentations en plein champs ont été réalisées afin d'évaluer les performances hydrauliques, hydrologique et enfin agronomiques du drainage de surface par le système de la raie longue. En parallèle, et à des fins de comparaison, des expérimentations ont été conduites sur deux autres systèmes irrigués par aspersion :

- une parcelle nivelée sans raies
- une parcelle non nivelée (sans raies).

La culture choisie pour ces trois systèmes est la betterave à sucre. A fin d'analyser les conséquences agronomiques de l'excès d'eau en conditions bien contrôlées, des expérimentations en pots ont été conduites pour déterminer l'impact des durées de submersion plus au moins longues sur la germination des graines et sur les plantules de la betterave à sucre.

Dans ce chapitre nous proposons d'abord une revue de la littérature concernant l'étude du ruissellement (assimilé dans ce document au drainage de surface) et plus exactement à sa genèse et à ses mécanismes. Nous présenterons ensuite le contexte expérimental et interpréterons enfin les résultats auxquels il a conduit.

### **II.2. Définition du ruissellement**

L'étude du ruissellement a fait l'objet de nombreux travaux spécifiques se rapportant aux différents processus initiant les chemins de l'eau dans le bassin versant (Augeard, 2006). Il constitue un des facteurs critiques contrôlant l'érosion (Hudson, 1995). Grill *et al.*, (1991) notent que les dégâts liés à l'augmentation du ruissellement et à l'érosion des terres agricoles ont connu une aggravation notable dans certaines régions de France. Historiquement, les travaux sur les principaux processus contrôlant le chemin de l'eau dans le bassin versant

avaient pour objectif une meilleure connaissance de la genèse des crues. L'historique des hypothèses émises à travers ce type d'approche est largement décrit dans la bibliographie (Bonnell, 1993 ; Ambroise, 1998 ; Ogden and Watts, 2000). Les travaux sur l'érosion et le devenir des polluants, notamment d'origine agricole, apportent des éléments complémentaires de description des flux d'eau dans le bassin versant. Les expérimentations sur la genèse du ruissellement ont été conduites à différentes échelles : locale ( $1 \text{ m}^2$ ), du champ (environ de  $100 \text{ m}^2$ ) à l'échelle de bassin ( $0.2 \text{ km}^2$ ) (Esteves *et al.*, 2003). Les effets d'échelle ont constitué une thématique importante dans la recherche en hydrologie (Wood *et al.*, 1990). Ces effets sur le ruissellement, liés à la variabilité spatiale des propriétés sont bien connues et ont été traitées par plusieurs chercheurs (Amermann and McGuinness, 1967 ; Yair and Lavee, 1985 ; Bonnell and Williams, 1986 ; Seyfried and Wilcox, 1995). Il en ressort que la production de ruissellement est significativement non uniforme dans l'espace à cause de la variabilité de la capacité d'infiltration de la surface du sol et dans le temps à cause de la croissance des végétaux. La variabilité des états de surface, l'encroûtement du sol, la végétation et l'état de rugosité de surface peut produire différents régimes hydrologiques à différentes échelles spatiales. La conductivité hydraulique des sols naturels peut présenter, d'une verticale à une autre, de grandes variations sur des distances de quelques mètres, en raison de la présence de macro-pores jouant un rôle prépondérant dans l'infiltration (Smettem *et al.*, 1991). Planchon (1991) relève que l'échelle du mètre carrée imposée par l'instrument de mesure, hydrologiquement bien connue, n'est d'aucune utilité opérationnelle. Toutefois, il est à noter que les échelles d'investigations sont soit trop petites soit trop grandes par rapport à la parcelle agricole.

### II.3. Définition et mécanismes de ruissellement

Définir le ruissellement en tant que processus hydrologique est une affaire très délicate. Le terme ruissellement s'avère ambigu, difficile à caractériser dans sa généralité, car lié à l'échelle de travail, des phénomènes étudiés et mesurés (Beven, 1991) cité par (Kao, 1994). Le terme ruissellement désigne plutôt les écoulements de surface à l'échelle de la parcelle agricole ou du bassin versant. En effet, le ruissellement est un processus hydrologique majeur, dont la quantification est nécessaire pour l'évaluation des phénomènes d'érosion et pour la prédiction des crues. L'eau de pluie arrivant à la surface se trouve répartie en deux fractions : le ruissellement et l'infiltration.

Le partage des précipitations à la surface des sols se fait selon plusieurs composantes : interception par la végétation, évapotranspiration, infiltration dans le sol, et ruissellement en surface. Sur les parcelles agricoles en saison hivernale, l'interception par la végétation et l'évapotranspiration sont considérées comme négligeables. L'eau ruisselée est celle qui ne peut s'infiltrer dans le sol.

Historiquement, les travaux sur les principaux processus contrôlant le chemin de l'eau dans le bassin versant avaient pour objectif une meilleure connaissance de la genèse des crues. L'historique des hypothèses émises à travers ce type d'approche est largement décrit dans la bibliographie (Bonnell, 1993 ; Ogden and Watts, 2000).

#### **II.4. Mécanismes de ruissellement**

Dans les systèmes hydrologiques, les précipitations génèrent trois types d'écoulement : des écoulements de surface, l'infiltration dans la zone non saturée et des écoulements souterrains en milieu saturés. Selon Moore et Foster (1990) l'écoulement de surface peut être généré par deux mécanismes :

- i. Par écoulement Hortonien qui se produit quand l'intensité de pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol (Dunne, 1983 ; Freeze, 1972 ; Horton ; 1933).
- ii. Par écoulement saturé en surface dû à la remontée de la nappe phréatique qui atteint la surface du sol. Lorsqu'une nappe affleure la surface du sol, la capacité d'infiltration de ce dernier devient quasi-nulle ; une intensité pluviométrique très faible pourra donc générer du ruissellement. Le ruissellement ainsi engendré peut également être alimenté par des exfiltrations d'eau provenant de nappes affleurantes « return flow » (Dunne and Black, 1970). Les surfaces où se produisent ces écoulements sont appelées « aires contributives saturées ». Ces surfaces ont été initialement étudiées par Cappus (1960) puis par Bresson et al (1964) et Dunne et Clark (1970). Leur évolution a fait l'objet de plusieurs travaux (Merot, 1988 ; Montgomery and Dietrich, 1995 ; Ambroise et al, 1996).

Le ruissellement Hortonien et celui généré par surface saturée peuvent être concomitants au sein d'un même versant suivant la position topographique et les propriétés de la pluie et du sol (Smith and Hebbert, 1983 ; Jordan, 1994 ; Cros-Cayot, 1996 ; Huang et al, 2001). Selon Freeze (1972), les deux mécanismes qui font partie d'un même processus hydrologique, peuvent agir séparément, mais dans la plupart des cas, ils agissent d'une manière conjointe. Kao *et al.*, (1999) ont montré par un suivi tensiométrique que les mécanismes Hortonien et de Dunne coexistent et que les seconds peuvent être prépondérants.

## II.5. La propagation du ruissellement

Dans le précédent paragraphe, la genèse du ruissellement a été définie comme un défaut local d'infiltration. Or, le ruissellement se manifeste comme un transfert d'eau à la surface du sol. L'eau non infiltrée est stockée dans les dépressions créées par le microrelief de la surface du sol et lorsque la capacité de rétention superficielle est atteinte, le transfert d'eau par ruissellement apparaît lorsque la pente du terrain le permet. La géométrie de la surface du sol (microrelief, pente) détermine donc le stockage possible en surface (Kamphorst *et al.*, 2000 ; Planchon and Dardoux, 2002), les connexions entre les dépressions remplies d'eau et par conséquent, la distance de transfert (Dardoux, 1999).

A petite échelle, la rugosité de la surface du sol intervient dans les vitesses de propagation du ruissellement (Govers *et al.*, 2000). A plus grande échelle, dans les parcelles cultivées à côté du volume des précipitations et l'énergie cinétique des gouttes, la conductivité hydraulique du sol, la rugosité de surface et la capacité de stockage du sol sont autant de paramètres essentiels influençant la production du ruissellement qui varie de façon dynamique durant la campagne agricole. Cette dynamique est influencée par les résidus de culture et la couverture végétale, la rugosité initiale du sol et la stabilité des agrégats du sol (Fohrer *et al.*, 1999 ; Cerdan *et al.*, 2001 ; Ruan *et al.*, 2001 ; Cerdan *et al.*, 2004 ; Le Bissonnais *et al.*, 2005), ainsi que par la présence quasi-permanente des traces des roues des engins agricoles (Robinson and Nazighadeh, 1992 ; Green *et al.*, 2005 ; Withers *et al.*, 2006) qui sont liées aux pratiques culturales. Ces pratiques influencent grandement le ruissellement à l'échelle locale, l'infiltration et la rugosité (Larson, 1964 ; Mwendera and Feyen, 1993, 1994 ; Andrieux *et al.*, 1996 ; Earl, 1997 ; Leonard and Andrieux, 1998 ; Van Dijck, 2000). Chahinian *et al.*, (2006) notent que le labour est l'opération culturale qui provoque les grands changements au niveau de la structure de la surface du sol.

L'ensemble des caractéristiques précitées engendre une non-linéarité entre la proportion de l'eau de pluie qui ruisselle et l'échelle d'observation du ruissellement. Le ruissellement dépend de l'hétérogénéité des facteurs contrôlant sa genèse notamment les propriétés physiques du sol et aussi de ceux contrôlant son transfert (rugosité, microrelief, infiltrabilité des zones non ruisselantes).

## II.6. Conséquences des submersions

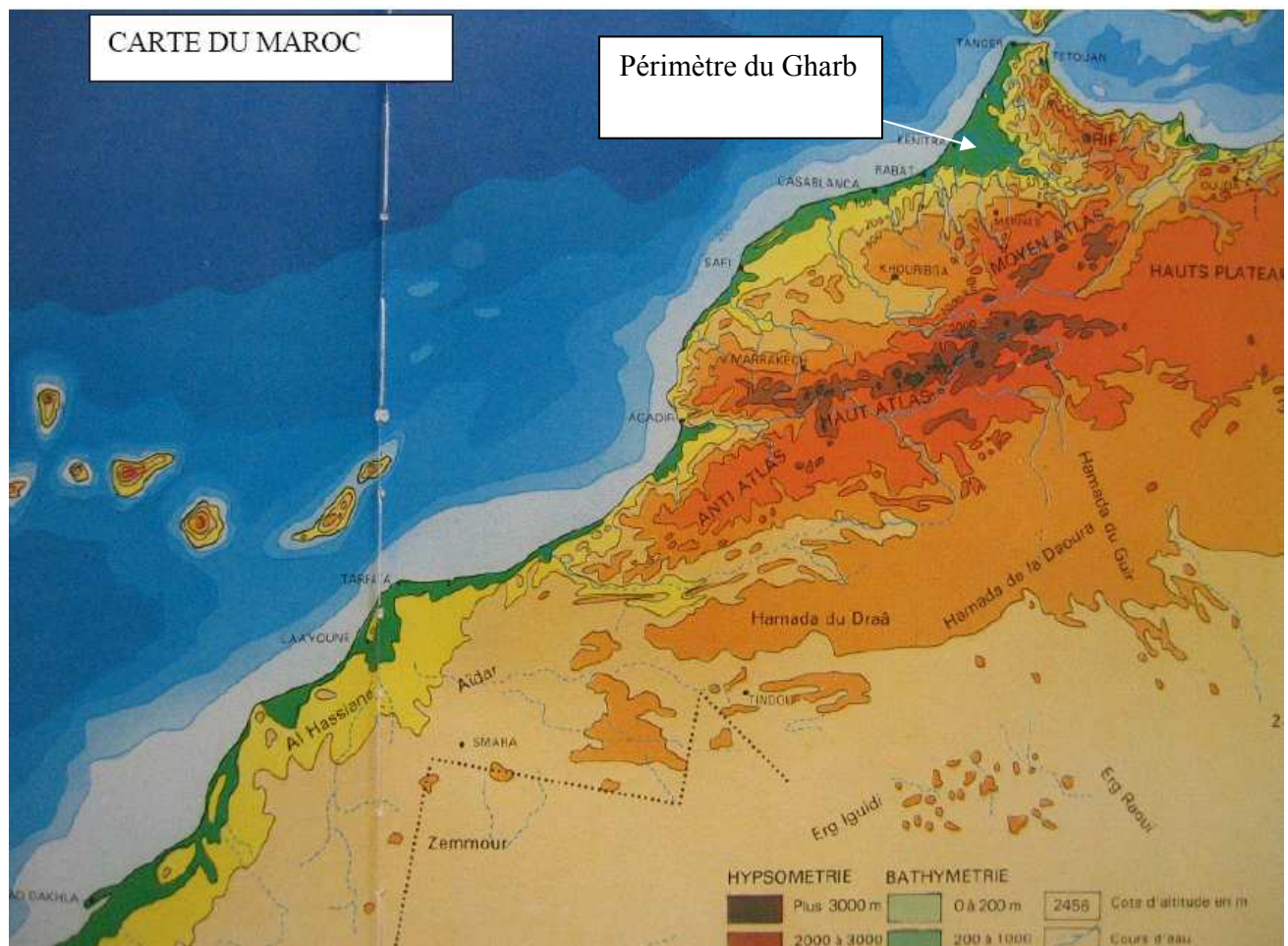
Il est un fait certain que le déficit du ruissellement, ou excès d'eau, génère des conditions d'engorgement qui modifient fortement le développement racinaire. Dans un sol engorgé, l'espace poral est totalement rempli d'eau et les échanges gazeux entre l'atmosphère et le sol

deviennent négligeables (Drew, 1983). Les cultures d'hiver sont fréquemment soumises à des périodes d'engorgement en eau du sol (Rebiere, 1996). En conditions d'engorgements, le développement racinaire est limité ce qui rend les cultures plus fragiles vis à vis du stress hydriques survenant en période estivale à cause du volume d'exploration du sol et de l'eau qui sont plus faibles (Kalita et Kanwar, 1992). L'engorgement d'un sol entraîne des modifications de l'ensemble des propriétés et des réactions physico-chimiques et biologiques dont il est le siège. Chabot, (2001) citant un certain nombre d'auteurs, note que les excès d'eau peuvent entraîner des modifications physiologiques sur les plantes. L'effet d'un engorgement sur la croissance de la plante revêt un grand intérêt pour l'orientation des pratiques d'aménagement

## **II.7. Le périmètre irrigué du Gharb**

### **II.7.1. Cadre géographique et physique**

La plaine du Gharb est située au nord ouest du Maroc et couvre une superficie géographique de l'ordre de 600 000 ha dont 388000 ha de superficie agricole utile, 122 600 ha de forêts et 66 200 ha de parcours et de terrains incultes Figure 4. Le Gharb se présente sous la forme d'une vaste cuvette entourée de collines. Le bassin hydrogéologique Gharb-Maamora est limité par l'océan atlantique à l'ouest, les collines Lalla-Zohra au nord, celles de Ksiri, Bou Drâa, Outita à l'est et par la Maâmora et les reliefs entre Khémisset et Tiflet au sud. La morphologie de l'ensemble du bassin correspond à une vaste cuvette dont les quatre cinquièmes sont à une altitude inférieure à 20 m, alors que les bordures présentent des reliefs doux. L'oued Sebou développe des méandres entre sa confluence avec l'Ouergha à l'entrée de la plaine et l'estuaire à l'aval de Kénitra ; ses affluents Beht, Tihli, Rdom sont canalisés dans la plaine.



**Figure 4.** Carte du Maroc avec localisation du périmètre irrigué du Gharb  
(Source : Bzioui 2004)

Le climat de la plaine du Gharb est de type méditerranéen avec une influence océanique. La pluviométrie annuelle est relativement élevée. Elle est très variable d'une année à l'autre et se concentre, pour 90 % entre les mois d'octobre et d'avril. Elle est aussi variable d'une zone à l'autre. La pluviométrie annuelle moyenne de la zone côtière avoisine 525 mm, alors que celle de la zone interne (Sidi Slimane) ne dépasse pas 450 mm. Elle augmente également en allant vers le nord. Elle est de 470 mm à Dar Gueddari au sud et de 577 mm à Souk Larbaa au nord. L'influence océanique sur les températures est bien marquée par le parallélisme des lignes isothermes à la côte atlantique. Les températures moyennes oscillent entre 11°C l'hiver et 27°C l'été. L'évapotranspiration annuelle avoisine 1200 mm. Elle excède ou compense la pluie entre novembre et mai.

Les sols du Gharb, essentiellement argileux, se sont formés sous des conditions d'hydromorphie et d'engorgement. Ils sont constitués essentiellement d'alluvions à teneur en

argile allant de 15 à plus de 55%. Les principaux types de sols sont : les vertisols ou Tirs (34%), Dehs qui sont des sols argileux peu développés (22%), les sols hydromorphes (15%) et les sols sablonneux (12.5%) (Taky *et al.*, 1999).

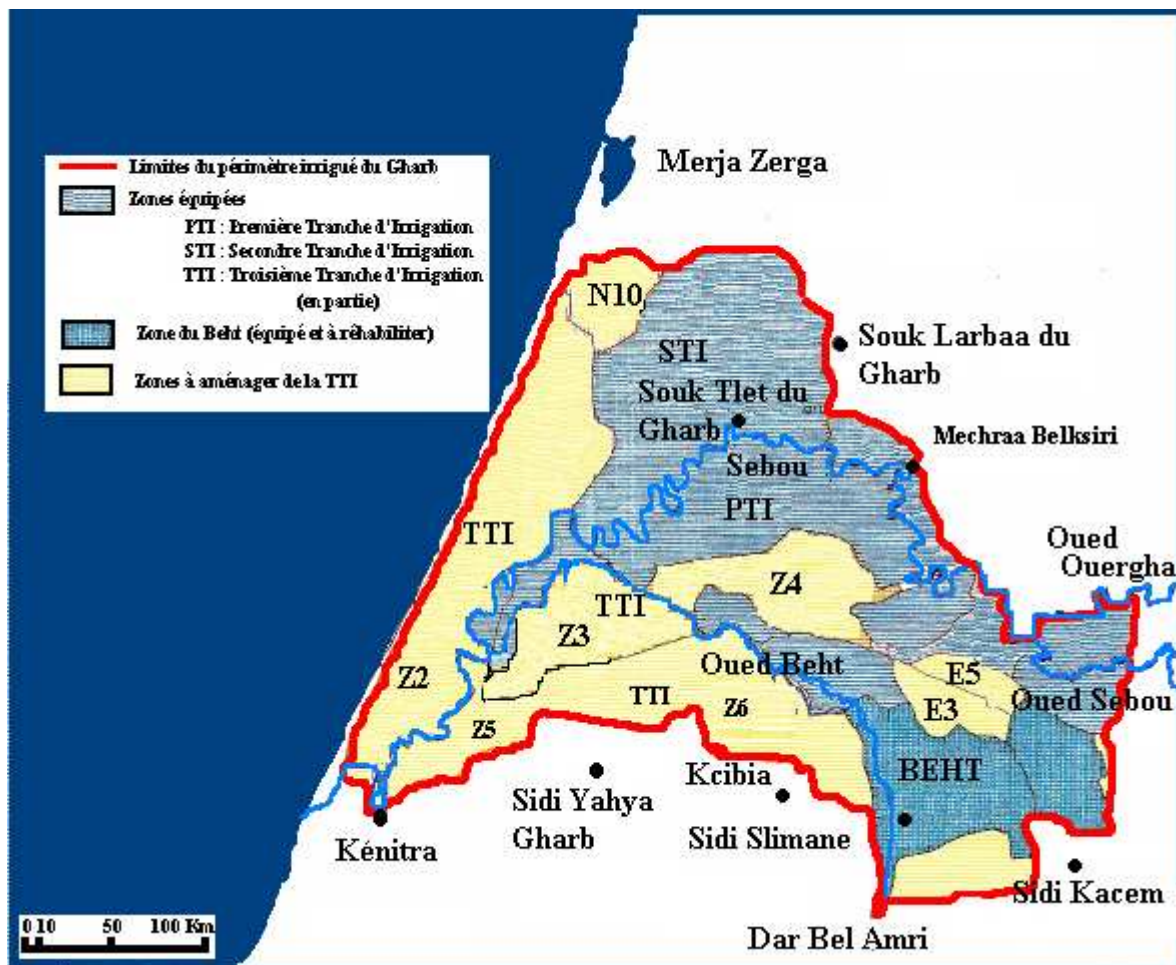
Sur le plan hydrologique, le principal cours d'eau du périmètre du Gharb est le Sebou avec ses principaux affluents l'Ouergha sur la rive droite et le Beht sur la rive gauche. Les moyennes annuelles des apports du bassin du Sebou sont d'environ 5000 Mm<sup>3</sup>/an (Série 1936-1996) et ne sont que de 3800 Mm<sup>3</sup>/an pour la série sèche de 1970-1996, soit une réduction d'environ 24%. (SCET-Maroc, 2008).

Sur la plan hydrogéologique, le Gharb présente deux types de nappes aquifère : une nappe profonde (à plus de 100 m) couvrant une superficie de 3500 km<sup>2</sup>, avec une épaisseur de 50 à 150 m, et une salinité n'excédant pas 1.5 g/l ; une nappe phréatique, dont le substratum appartient aux argiles soltaniennes ou Gharbienne oscillant entre 8 et 15 m de profondeur dans plus de 75% de la plaine (Pallix et Tabet, 1973). Elle est alimentée par drainance verticale de la nappe profonde et par infiltration des eaux de pluie et d'irrigation (représentant une part de 90% à 95% des apports). L'évaporation et la faible circulation des eaux de la nappe phréatique renforcent sa salinisation (supérieure à 10 g/l, Debbarh *et al.*, 1999).

## **II.7.2. Aménagements hydro agricoles**

### **II .7.2.1. Réseaux d'irrigation**

L'eau d'irrigation du périmètre du Gharb provient de 3 barrages : le barrage El Kansera (270 Mm<sup>3</sup>) sur l'oued Beht, le complexe Idriss I<sup>er</sup>- Allal Fassi (1.23 Mm<sup>3</sup>) sur oued Inaouene et le barrage El Wahda (3.8 MM de m<sup>3</sup>) sur l'oued Ouergha. La superficie équipée en grande hydraulique couvre 120000 ha dont 29 000 ha pour le périmètre du Beht, 36000 ha constituant la première tranche d'irrigation (PTI) , 54 000 ha à la seconde tranche d'irrigation (STI) et le reliquat correspond à la troisième tranche d'irrigation (TTI) dont l'aménagement est en cours actuellement et a débuté durant la fin du siècle dernier Figure 5.



**Figure 5.** Carte des différentes tranches d'aménagement du périmètre du Gharb

Source : d'après ORMVAG (1997)

Les systèmes d'irrigation adoptés au Gharb actuellement sont : le gravitaire sur 97 000 ha dont 13 500 ha par submersion pour la riziculture, l'aspersion 20000 ha et 3000 ha en basse pression.

L'infrastructure mise en place pour l'irrigation est complexe et diversifiée. Elle est constituée principalement de 56 stations dont 54 de pompage et 2 d'exhaure, et de 7 stations de mise en pression, constitués de 270 groupes motopompes (ORMVAG, 2008).

La superficie équipée, est divisée en secteurs indépendants qui font environ 3000ha chacun. La taille des secteurs a été dictée par des considérations d'optimisation de consommations énergétique. Chaque secteur est considéré comme une entité hydraulique et est caractérisé par une ossature alimentée par une station de pompage sur l'oued Sebou ou l'oued Beht, mis à part ceux relevant du périmètre Beht, alimentés gravitairement à partir du canal principal. Chaque secteur est composé outre d'une station de mobilisation des eaux, de canaux

secondaires et tertiaires pour acheminer les eaux d'irrigation pour le cas du gravitaire ou de conduites pour amener les eaux aux bornes d'irrigation. Chaque secteur est divisé en blocs réguliers constituant la trame d'aménagement. Le bloc est lui aussi subdivisé en plusieurs soles (unité agronomique) dans lesquels les agriculteurs ont été répartis lors du remembrement, opération préalable à l'aménagement hydro agricole.

### II.6.2.2. Réseau de drainage et d'assainissement

Le système de drainage dans le Gharb est constitué de : (i) un réseau de fossés à ciel ouvert, assurant l'assainissement superficiel et les eaux recueillies des collecteurs, (ii) d'un drainage de surface par profilage qui permet d'assainir les eaux de pluies avant percolation et (iii) d'un drainage souterrain par canalisations enterrées. La superficie drainée par tuyaux couvre plus de 100 000 ha (Hammani 2002). Le réseau d'assainissement de la plaine du Gharb est de type ramifié de l'aval vers l'amont. On y trouve les colatures quaternaires d'assainissement longeant les longueurs des soles. Elles recueillent les eaux excédentaires à la parcelle (excédents d'irrigation et de pluie). Les colatures quaternaires rejettent leurs eaux dans les fossés tertiaires qui les rejettent à leur tour dans les fossés secondaires qui servent d'exutoire aussi pour les collecteurs de drainage. Les exutoires principaux sont les Oueds et les canaux de grande dimension. Les dimensions des différents fossés sont variables, en fonction de leur catégorie et de leur position sur le réseau. Pour les fossés artificiels, le fruit de berge adopté est de 1,5, la largeur au plafond varie de 0,5 à 3m, avec une profondeur pour les secondaires et primaires variant de 2 à 4 mètres. Le Tableau 1 relate l'importance et les caractéristiques du réseau de drainage dans le Gharb.

**Tableau 1.** Importance et caractéristiques des réseaux de drainage dans le Gharb.

| Tranche d'irrigation | Superficie drainée | Drainage souterrain en km |             | Ecartements en m | Assainissement de surface linéaire en Km |            |           |
|----------------------|--------------------|---------------------------|-------------|------------------|------------------------------------------|------------|-----------|
|                      |                    | Drains                    | collecteurs |                  | Primaire                                 | Secondaire | Tertiaire |
| PTI                  | 30781              | 6290                      | 1011        | 30 à 80          | 152                                      | 216        | 850       |
| STI                  | 30525              | 4669                      | 836         | 30 à 120         | 109                                      | 209        | 515       |
| BEHT                 | 14902              | 2142                      | 457         | 30 à 120         | 51                                       | 122        | 360       |
| TOTAL                | 76208              | 13101                     | 2304        |                  | 312                                      | 547        | 1725      |

Source : Hammani (2002)

Pour les ouvrages d'assainissement, les infrastructures relatives au niveau du Tableau 1 constituent ce qu'on appelle les équipements externes dont la charge de l'entretien revient à l'Etat selon les dispositions du code des investissements agricoles (B.O.R.M., 1969).

Concernant les équipements internes il a été indiqué au paragraphe précédent que la sole est l'unité agronomique de la trame d'aménagement. Les parcelles des agriculteurs étant recasées au niveau de ces soles. En matière d'assainissement, chaque sole est dominée par une colature dite quaternaire. En effet, celle-ci est appelée à recueillir les eaux excédentaires provenant soit des irrigations soit des précipitations. L'entretien de ces colatures est à la charge des agriculteurs du fait qu'elles sont considérées comme des équipements internes selon les dispositions du code des investissements agricoles (B.O.R.M, 1969).

### **II.7.2.3. Critères de conception du réseau de drainage et d'assainissement**

#### **a) Réseaux de drainage souterrain**

Selon Lahlou et Hamdi, (1989) le dimensionnement des réseaux de drainage dans le Gharb s'est fait depuis les débuts des premiers travaux sur des bases théoriques compte tenu de l'inexistence de références locales dans ce domaine.

Selon Pallix et Tabet (1973) pour la plupart des cultures pratiquées dans le Gharb, une tranche de sol drainée moyenne de 1 m était largement suffisante. Il est toutefois recommandé de porter cette valeur à 1,2 m pour les cultures arbustives, orangers en particulier. En l'absence d'expérimentation in situ, et compte tenu de la difficulté d'acquérir la porosité de drainage (paramètre hydrodynamique nécessaire au calcul en régime variable), le choix des concepteurs s'est porté sur une approche de type régime permanent. Le calcul de l'écartement des files de drains a alors été effectué en utilisant la formule de (Hooghoudt, 1940) en sol homogène et en régime permanent et vérifié par la méthode d'Ernest (1956).

#### **b) Réseaux d'assainissement**

Le réseau d'assainissement mis en place est composé des colatures quaternaires qui recueillent les excédents d'eaux au niveau des parcelles des agriculteurs qui rejettent les eaux dans les fossés tertiaires. Les fossés tertiaires sont reliés aux fossés secondaires qui constituent aussi les exutoires des eaux de drainage souterrain. Ensuite, les eaux sont véhiculées par les canaux primaires pour rejoindre soit la lagune de Merja Zerga pour la STI nord, où l'oued Sebou pour la PTI, la STI sud et le périmètre du Beht. C'est un réseau enchevêtré avec une dépendance fonctionnelle de l'aval vers l'amont.

Le calcul du débit de projet du réseau d'assainissement s'effectue conformément à la procédure suivante (Hammani, 2002) :

- Pour les superficies inférieures à 1000 ha le débit d'assainissement est proportionnel à la superficie ; le module est de 2l/s/ha en rive droite du Sebou et 1,46 l/s/ha en rive gauche. C'est le cas des colatures quaternaires et des fossés tertiaires d'assainissement.
- Pour les superficies supérieures ou égales à 1000 ha, en rive droite, on applique la formule d'Eliott 2

$$Q = 0.49S^{0.5} * 0.054S \quad \text{Equation 1}$$

$Q$  = Débit en m<sup>3</sup>/s

$S$  = Superficie en Km<sup>2</sup>

- Pour les superficies supérieures ou égales à 1000ha en rive gauche, on applique la formule de Chapiers

$$Q = 384RC_r^{3/4} \quad \text{Equation 2}$$

( $Q$  en m<sup>3</sup>/s ;  $S$  en Km<sup>2</sup>,  $R$  est appelé « taux hydraulique moyen » en mètre de pluie par heure,  $C_r$  coefficient de ruissellement)

Le réseau des fossés est dimensionné à l'aide de la formule de Manning Strickler :

$$Q = KSm\sqrt{I}R_H^{2/3} \quad \text{Equation 3}$$

$K$  = Coefficient de Manning Strickler

$Sm$  = section mouillée (m<sup>2</sup>)

$I$  = pente du fond (m/m)

$RH$  = Rayon hydraulique (m)

Le coefficient  $K$  est pris égal à 33, ce qui correspond à un fossé en terre neuf. Les vitesses d'écoulement ont été prises entre 0,2 et 0,8 m/s. La pente minimale a été fixée à 0,1 ‰. Les fonds des fossés recevant ces collecteurs de drainage ont été fixés à 50cm en dessus de la côte projet des collecteurs.

Pour les fossés, le dimensionnement a été réalisé avec le cumul des débits d'assainissement et des débits de drainage. Toutefois, il est à noter que les modèles précédents n'ont pas fait l'objet de vérification ou de calage sur le terrain (Taky *et al.*, 1999). Hammani, (2002) ajoute qu'aucune précision n'est donnée par les ingénieurs conseils quant au choix de ces formules

et qu'on trouve des formules similaires en bibliographie mais on a aucune idée sur la façon dont leur coefficients ont été déterminés pour le périmètre du Gharb.

## **II.8. La station expérimentale de Souk Tlet**

La station des Expérimentations Hydro-agricoles de Souk Tlet du Gharb (SEHA) a été mise en place dans le cadre d'une convention conclue entre l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb et le Cemagref dans le but d'acquérir des références sur le fonctionnement du drainage dans la plaine du Gharb. Il s'agissait ensuite d'établir des règles de conception adaptées au contexte local (Bouarfa *et al.*, 1998). Cette station devait permettre d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique, hydraulique et salin du drainage agricole. Des essais sur les techniques des irrigations et des besoins en eau des cultures y ont été également menés.

### **II.8.1. Contexte physique**

La station expérimentale est sise dans le secteur C 3 de la STI au nord ouest du périmètre irrigué du Gharb à environ 60 Km de au nord de Kénitra sur la route Rabat-Tanger (34,67° latitude Nord et 8,75° longitude Ouest). Elle est située à une altitude moyenne de 8.7 m. Comme déjà évoqué le climat est de type méditerranéen avec une influence océanique pendant l'hiver et une forte demande climatique en été. Trois périodes peuvent être distinguées :

- De novembre à février : les pluies excèdent l'évapotranspiration;
- De mars en mai: le déficit hydrique est très faible, la pluie peut le compenser en année humide;
- De mai en septembre : le déficit hydrique est très grand.

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de 570 mm, avec des fluctuations interannuelles très importantes mais avec des fluctuations annuelles pouvant varier de 240 mm à 800 mm. Plus de 80% des précipitations ont lieu entre les mois de novembre et avril. Les températures moyennes varient entre 13°C pendant l'hiver et 27°C pendant l'été. Ces températures sont souvent influencées par les vents océaniques en hiver et continentaux pendant l'été.

Sur la station expérimentale de Souk Tlet, on distingue principalement deux types de sols:

Les tirs: vertisols plus ou moins hydromorphes à texture lourde à prédominance d'argile gonflante (55%-65% ) .

Les Dehs: sols jeunes peu évolués d'apports alluvionnaires récents. Ils ont une teneur faible en argile et calcaire, avec une forte teneur en limon (20 à 40%).

La nappe phréatique excède rarement 3 m de profondeur mais connaît des fluctuations saisonnières importantes. Elle peut affleurer en surface lors des hivers intenses. Les niveaux de salinité varient entre de 10 à 14 g/l.

Une nappe peu profonde est présente dans la station expérimentale. Son niveau phréatique est sujet à des fluctuations saisonnières relativement importantes. En effet, la nappe peut affleurer pendant l'hiver, alors qu'à la fin de la saison sèche, elle peut toutefois descendre jusqu'à une profondeur de 3m. Les eaux de la nappe sont de très mauvaise qualité chimique et la salinité de la nappe est supérieure à 10 g/l (Debbarh *et al.*, 1999).

## II.8.2. Dispositif expérimental

La station expérimentale de Souk Tlet couvre une superficie de 30 ha dont 18 ha sont utilisés pour l'expérimentation en drainage (Figure 6). Elle comporte 14 parcelles principalement cultivées en canne à sucre mise à part la P2 et la P13 cultivées en betterave à sucre. Les parcelles ont été conçues pour être représentatives d'un certain nombre de traitements permettant de tester différentes profondeurs de drains, différents écartements et la technique de drainage par taupage. Les caractéristiques de chacune des parcelles sont résumées dans le Tableau 2 suivant :

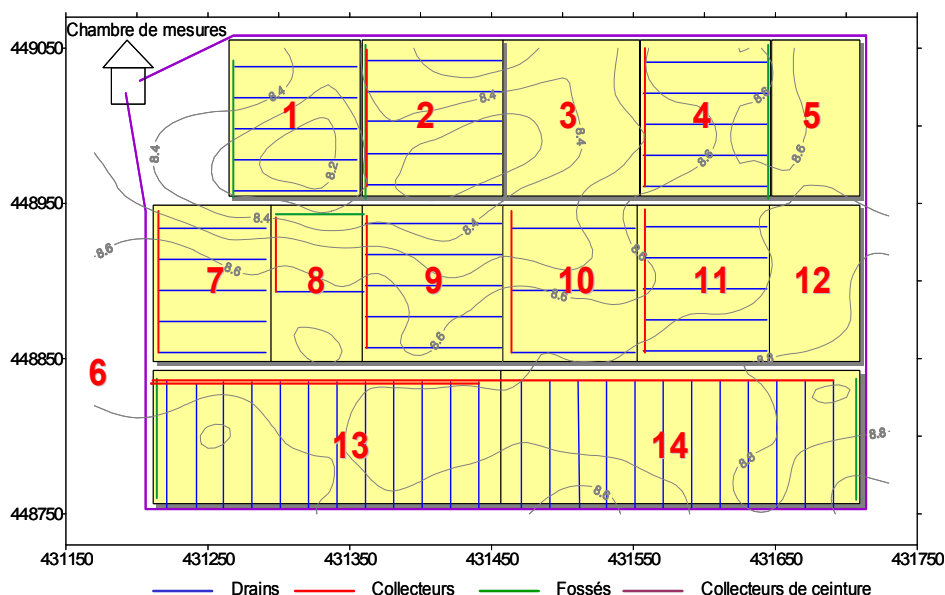
**Tableau 2.** Caractéristiques des parcelles de la station de Souk Tlet

| N° de la parcelle | Surface (ha) | Ecartement   | Profondeur des drains (m) | Mode d'irrigation |
|-------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------------|
| 1                 | 0.8606       | 60           | 1.2                       | Aspersion         |
| 2                 | 0.9632       | 20           | 1.0                       | Aspersion         |
| 3                 | 0.8484       | Non drainée  | 6                         | Aspersion         |
| 4                 | 0.8664       | 60           | 1.0                       | Aspersion         |
| 5                 | 0.6292       | Non drainée  | 6                         | Aspersion         |
| 6                 | 3.1575       | Non drainée  | 6                         | Gravitaire        |
| 7                 | 0.7653       | Non drainée  | 1.3                       | Aspersion         |
| 8                 | 0.6263       | 40 + Taupage | 0.9                       | Aspersion         |
| 9                 | 0.9503       | 40           | 1.3                       | Aspersion         |
| 10                | 0.8634       | 40           | 1.1                       | Aspersion         |
| 11                | 0.8484       | 20           | 1.2                       | Aspersion         |
| 12                | 0.6296       | Non drainée  | 6                         | Aspersion         |
| 13                | 1.8907       | 80           | 1.3                       | Gravitaire        |
| 14                | 1.8880       | 60           | 1.2                       | Gravitaire        |

Les drains sont des tuyaux en PVC annelé et perforé, leur diamètre est de 58/65 ; la pente de pose est de 2‰. Les collecteurs sont aussi en PVC annelé ; deux diamètres sont utilisés 91/100 et 115/125 ; la pente de pose varie entre 2‰ et 7‰. A la sortie de chaque parcelle

drainée les collecteurs sont prolongés vers une chambre de mesures à l'extrémité aval de la station expérimentale. Pour éviter les apports latéraux, deux drains de ceinture à remblai gravillonné isolent l'aire de l'expérimentation du reste de la station, leur pente de pose est de 1‰. Après les mesures de débits, les eaux sont stockées dans une bache de pompage d'un volume de 60 m<sup>3</sup> où elles sont ensuite évacuées dans un fossé d'assainissement par l'intermédiaire de deux électro-pompes automatiques de 30 l/s chacune, et d'une pompe à moteur Diesel utilisable en cas de panne ou au cours de la période pluvieuse. (Hammani, 2002).

Toutes les parcelles sont irriguées soit par système aspersion (P1, P2, P3, P4, P5, P7, P8, P9, P10, P11 et P12), soit par le système gravitaire (P6, P13 et P14) et neuf parcelles sont drainées



**Figure 6.** Dispositif expérimental de la station de Souk Tlet

## II.8.3) Protocole expérimental

### II.8.3.1) Objectif des expérimentations

Le travail porte sur l'évaluation des performances du nivellement et les systèmes d'irrigation à la raie, avec une prise en compte conjointe des excès d'eau hivernaux et du déficit estival. L'originalité de l'approche réside dans l'utilisation de traitements, sous forme de modèles de surface, aussi bien pour l'irrigation que pour l'évacuation des excès d'eau hivernaux. L'objectif de l'expérimentation est d'évaluer sur le plan hydraulique, hydrologique et agronomique les performances du nivellement et la mise en place de raies vis à vis du drainage de surface. Trois traitements ont été retenus pour l'expérimentation (i) parcelle

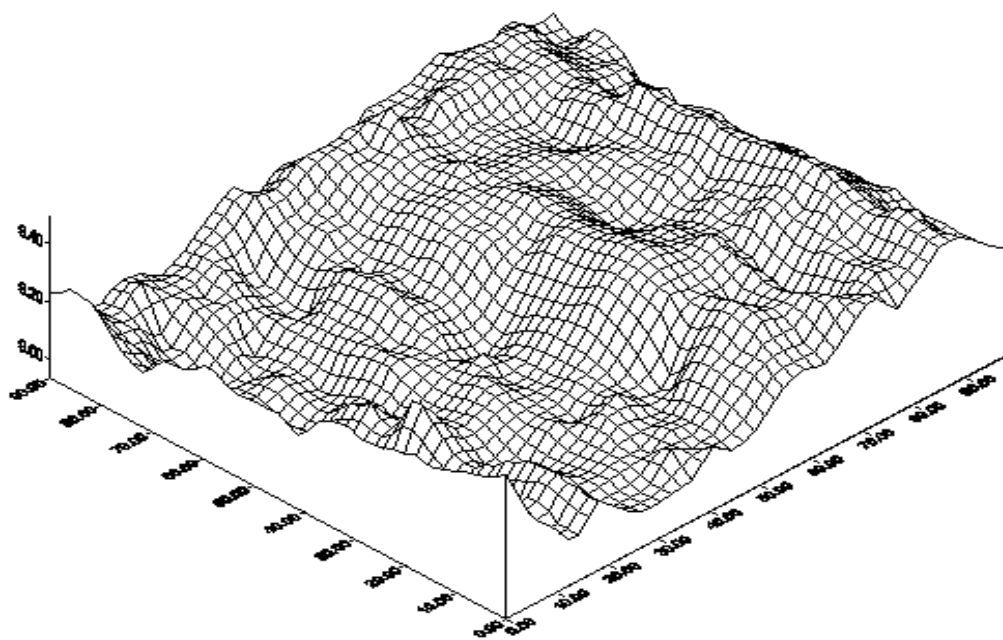
nivelée dotée de raies, (ii) parcelle nivelée sans raies et (iii) parcelle non nivelée. Ainsi, deux volets sont à distinguer au niveau de ce travail :

L'étude expérimentale s'appuie sur une série d'observations obtenues dans 3 parcelles ayant 3 modèles différents concernant l'état de surface ce qui leur procure un comportement différent vis à vis du drainage de surface. Les équipements devraient permettre d'appréhender le ruissellement et les rendements obtenus au niveau des différentes parcelles retenues pour l'expérimentation. Les parcelles portant les traitements sont indépendantes et ne répondent à aucun dispositif statistique pré-établi.

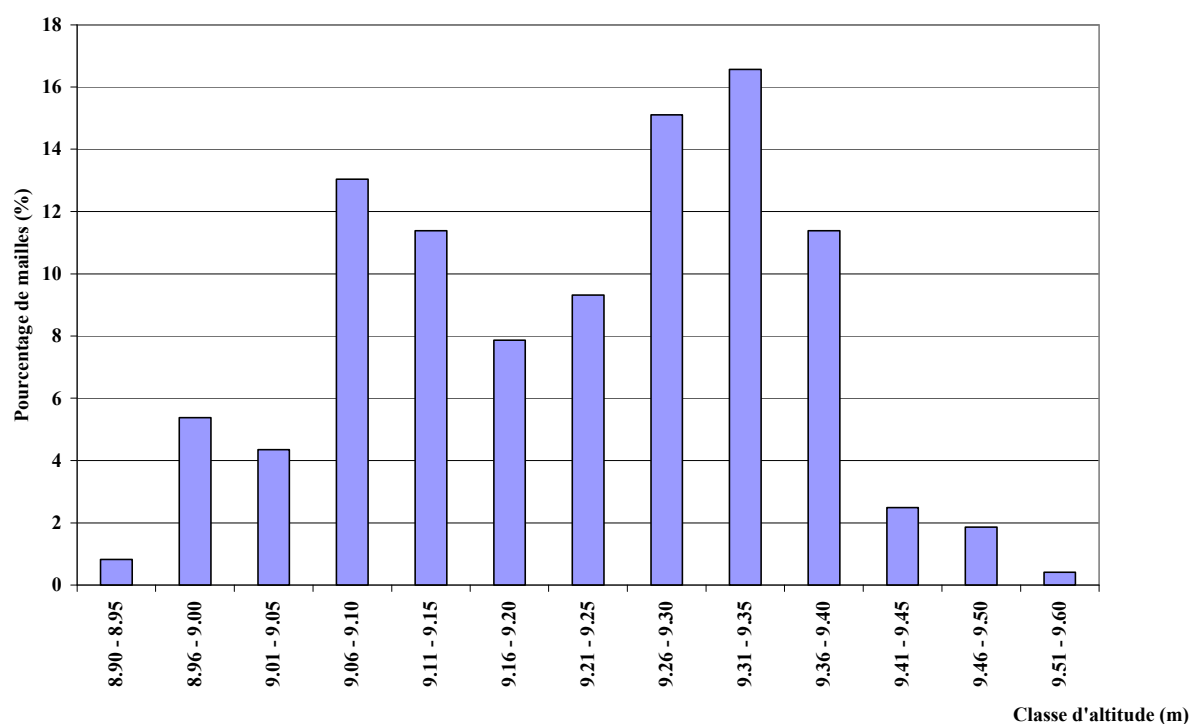
### II.8.3.2. Dispositif de mesures

Le domaine d'étude quant à sa variabilité spatiale (ou par simplification **parcelle**) concerne les trois cas de figures suivants :

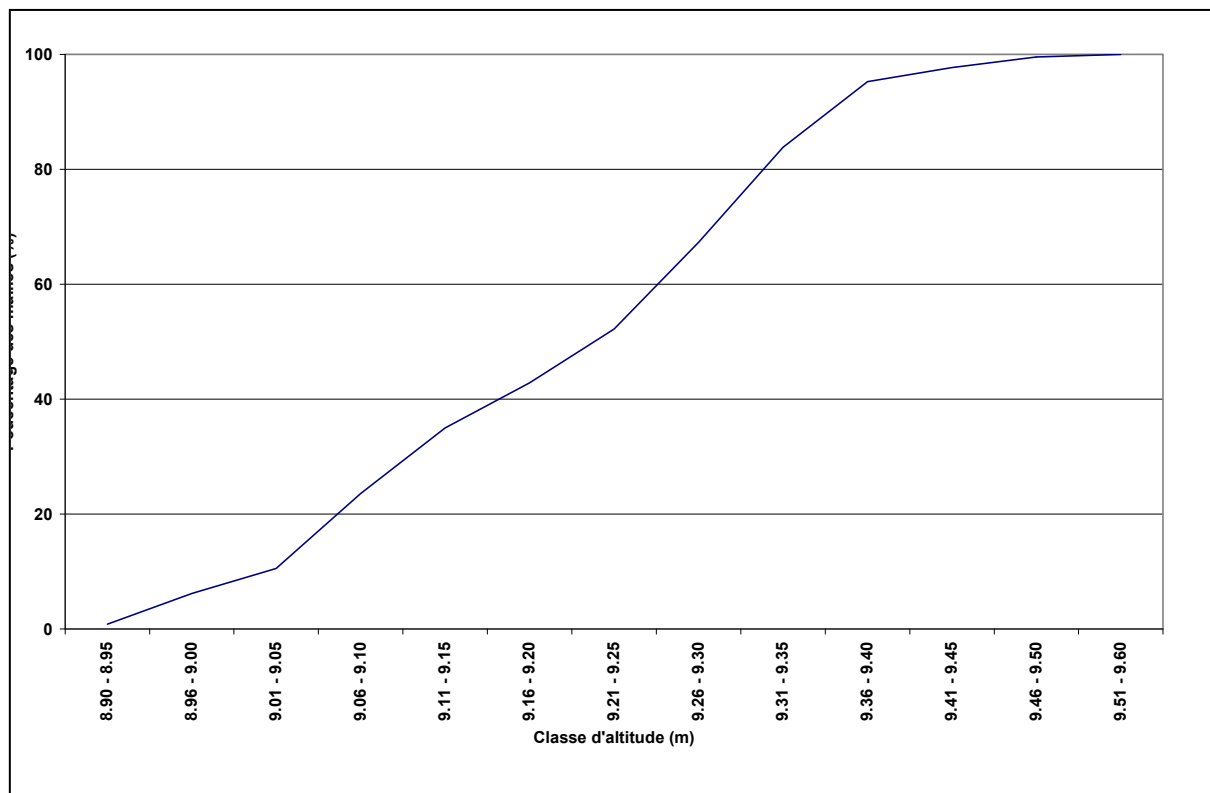
- (i) La première parcelle couvre une superficie de 1.26 ha, nivelée. Elle présente une longueur de 240 m et une largeur de 52.5 m. Elle dispose d'une pente de 2‰ dans le sens de la longueur. Elle est dotée de raies approximativement trapézoïdales (juste après confection) dont les caractéristiques sont les suivantes : 240 m de longueur, écartement de 1.5 m, profondeur moyenne de 20 cm, largeur maximale moyenne de 30 cm, largeur moyenne du fond 15 cm. Cette parcelle dispose d'une colature avale recueillant les eaux excédentaires des précipitations et celles des irrigations. La colature est également trapézoïdale de 0.3 m de profondeur et 1 m d'ouverture en gueule ;
- (ii) La seconde parcelle est nivelée selon une pente de 2‰. Elle ne dispose pas de raies mais est dotée d'une colature à l'aval de la parcelle dans le sens de la pente du terrain.
- (iii) La troisième parcelle a une superficie de 0.96 ha et n'est pas nivelée et n'a pas de raies. Cette parcelle présente des dénivelées pouvant atteindre 80 cm selon un levé topographique réalisé avec une maille de 5 m de côté (Figure 7). Cette parcelle présente 483 mailles. La Figure 8 présente le pourcentage par classe d'altitude au niveau de la parcelle non nivelée. Cette parcelle a une altitude moyenne de 9.25 m. Il se trouve que dans cette parcelle, 252 mailles disposent d'une altitude supérieure et 231 mailles d'une altitude inférieure à la moyenne (Figure 9). La parcelle est bordée de bourrelets et isolée en surface sur le plan hydraulique. Ces parcelles sont drainées par des tuyaux enterrés à une profondeur d'environ de 1.4 m et écartés de 40 m.



**Figure 7.** Levé topographique de la parcelle non nivelée



**Figure 8.** Répartition des différentes mailles de la parcelle non nivelée par tranche d'altitude



**Figure 9.** Pourcentages cumulés des mailles par tranches d'altitude

Les parcelles retenues pour l'expérimentation présentent le même type de sol et sont représentatives des parcelles cultivées dans la plaine du Gharb qui a bénéficié des investissements importants en matière d'aménagement hydro-agricole.

L'étude expérimentale a porté sur deux aspects distincts :

- **Performances hydraulique et hydrologique du nivellement et de la mise en place des raies sur le ruissellement hivernal :** Ce qui nous intéresse à ce niveau, ce sont les hauteurs d'eau recueillies à l'aval de la parcelle. La parcelle étant prise comme une unité de base dans le suivi expérimental ce qui constitue aussi une des originalités de cette étude.
- **Performances agronomiques :** En agronomie, l'utilisation d'un dispositif expérimental sans répétition présume que les effets dus à la variabilité liée aux caractéristiques physiques et la fertilité du sol et à d'autres facteurs (non étudiés) sont négligeables par rapport aux différents facteurs principaux (statistique et géostatistique) (Gomez et Gomez, 1984 ; Sprent, 1992) cités par Olufayo (1994). En effet, les parcelles expérimentales nivelées et non nivelée portent sur le même type de sol selon les études pédologiques effectuées au niveau de la SEHA de Souk Tlet. Les

parcelles expérimentales diffèrent du point de vue de la topographie. Le sens de la pente est déterminant pour les écoulements de surface. On a considéré que le point le plus discriminant est le sens de la pente pour les parcelles nivelées et la position topographique pour la parcelle non nivelée. La variabilité de la croissance du végétal et des rendements est appréhendée à partir des mesures effectuées sur des échantillons prélevés aléatoirement selon un maillage régulier. De ce fait, les placettes objets d'un suivi de la croissance du végétal et des rendements seront établies en respectant des localisations (amont, milieu et aval des parcelles nivelées) et des points particuliers (haut et bas de la parcelle non nivelée). L'ensemble des mailles des trois parcelles sont numérotées selon « i » numéro de la ligne et « j » numéro de la colonne en partant du sommet nord ouest. Les Figure 7 à Figure 9 nous renseignent sur les points bas et hauts de la parcelle non nivelée. Pour les parcelles nivelées, l'amont porte sur le 1/3 de la longueur, milieu sur le 1/3 et l'aval sur le tiers restant. Pour la parcelle non nivelée, les mailles ont été numérotées de Mnn01 01 à Mnn21 23. Pour la parcelle nivelée sans raie de Mns 11 à Mns 56 4 et pour la parcelle nivelée dotée de raies de Mnr 11 à Mnr 56 11. Les parcelles objet du suivi et des rendements sont tirées aléatoirement selon leurs numéros correspondants. Pour la parcelle non nivelée, les cotes altimétriques nous ont permis d'identifier les points haut et bas.

### • II.8.3.3. Systèmes d'irrigation adoptés

A partir de la fin du printemps, le recours à l'irrigation devient impératif pour combler le déficit hydrique. Les systèmes d'irrigation adoptés sont les suivants :

(i) La parcelle nivelée, disposant de raies est irriguée gravitairement. Les raies, précédemment décrites, ont été conçues pour assurer le transfert, sans débordement, d'un débit maximal d'environ 2 l/s sous irrigation et elles sont ouvertes à l'aval pour assurer le transit de l'eau vers la colature. Le fractionnement du débit distribué en tête de la parcelle est opéré au moyen du système rampe à vannettes. Les doses d'irrigations apportées ont été déterminées sur la base d'un compteur volumétrique.

Pour les parcelles (ii) nivelée sans raies et (iii) non nivelée, le système aspersionnel a été adopté. Il s'agit d'une couverture partielle de 18 \* 18 m (carré), fonctionnant sous une pression de 3 bars avec une pluviométrie de 4,2 mm/h. Des pluviomètres ont été installés pour déterminer les doses réellement apportées en irrigation.

Ces parcelles sont dénommées comme suit dans la suite du document : (i) Pnivraies pour la parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement, (ii) PnivsansR pour la parcelle nivelée sans raies irriguée par aspersion et (iii) Psansniv pour désigner la parcelle non nivelée et irriguée par aspersion

### **Conduites des irrigations**

Les irrigations pour l'ensemble des parcelles ont été conduites dans la mesure du possible à l'ETM. Une fois que le déficit hydrique avoisine 100 mm, les irrigations sont déclenchées. Aussi, Une partie de chacune des trois parcelles a été conduite en sec les deux premières campagnes. La troisième campagne, ayant nécessité une irrigation au semis, le traitement en sec n'a pu être reconduit. Les coefficients culturaux adoptés sont ceux de la FAO (Doorembos *et al.*, 1977). L' $ET_0$  est estimée par la formule de Penman-Monteith (Smith, 1992).

Les irrigations ont été arrêtées une quinzaine de jours avant la récolte (Ruellan, 1968).

### **II.8.3.4. Matériel végétal et conduite des cultures**

#### **a) Choix du matériel végétal**

La culture retenue pour les expérimentations est la betterave à sucre. La culture occupe environ 7 millions d'hectares dans le monde (FAO, 2002). Elle a été introduite au Maroc en 1962. La situation géographique du Maroc entre la 30<sup>ème</sup> et le 35<sup>ème</sup> parallèle a favorisé la pratique de cette culture. Chaque année au Maroc, environ 50 000 ha sont emblavés en betterave dont 15.000 ha au niveau de la plaine du Gharb. Cette superficie atteindra 30.000 ha/an au terme de l'aménagement de la plaine. Le Gharb contribue à hauteur de 25.5% de la production nationale. La betterave sucrière est semée au Maroc en automne et récoltée en début d'été. C'est une plante à cycle long occupant le sol aux environs de huit mois et nécessitent beaucoup de soins. La betterave est une plante dont les phases de germination, de levée et de croissance juvénile sont délicates. Le semis revêt une importance primordiale. La mise en terre des semences doit répondre à des spécifications précises quant à la structure superficielle du sol, sa planéité et l'absence de résidus en surface. Jenane *et al.*, (1997) note que la préparation du sol vise deux objectifs (i) la réalisation d'une structure superficielle qui optimise la mise en terre et donc la levée et (ii) la conservation en profondeur d'horizons fragmentés et homogènes permettant un enracinement rapide, donc une bonne alimentation en eau et éléments nutritifs. Ce dernier point est confirmé par l'ITB (2006) qui relève que la betterave a besoin d'un sol à structure homogène et suffisamment aéré pour un développement régulier et profond de la racine pivotante ainsi qu'une bonne exploration par le système racinaire. Cette culture au même titre que les cultures d'automne et d'hiver

pratiquées dans le Gharb, souffre de l'excès d'eau. En effet, les superficies récoltées annuellement restent inférieures à celles semées ce qui est dû aux aléas climatiques (inondations, stagnations et sécheresse). Les excès d'eau surviennent à des périodes qui coïncident souvent avec les stades sensibles des cultures (germination, levée, début de croissance etc).

### **b) Eléments agronomiques relatifs à la culture de la betterave à sucre**

La betterave sucrière (*Beta Vulgaris L*) appartient à la famille des chénopodiacées qui compte environ 1400 espèces réparties en 105 genres (Watson et Dallwitz, 1992). Les membres de cette famille sont des plantes dicotylédones, en général herbacées. Il existe trois types de variété de betterave sucrière, (i) type Z à cycle court un rendement en racines faible par rapport aux autres types de variétés (ii) type N présente une richesse saccharine moyenne, rendement moyen et un cycle moyen (iii) le type E présente un cycle long, une richesse en sucre faible et un rendement racine élevé. La betterave à sucre est en général une plante bisannuelle, mais dans certaines conditions elle peut se comporter comme une espèce annuelle (Smith, 1987). La première année, la plante produit une grosse racine pivotante charnue et la deuxième année, une tige produisant des graines. En Europe et en Amérique du Nord, la betterave est plantée au printemps pour une récolte en automne de la même année. Pour la montée à graine, la betterave doit survivre à une période hivernale de basses température comprise entre 4 et 7°C (vernalisation) pour que la racine monte à graines la saison suivante et que le stade reproductif soit déclenché (Soltner, 1999). Au Maroc, la betterave est semée en automne et le début de l'hiver et récoltée entre juin et début août. Les fortes chaleurs en fin de la première décade de juillet, avec des températures supérieures à 30°C, favorisent la transpiration et entraînent une réduction de la matière sèche et de la teneur en sucre (Papy, 1973). Les chaleurs estivales finissent par anéantir le développement de la betterave à sucre. C'est au cours de la première année que la betterave sucrière concentre ses réserves en sucre dans la racine. D'où sa récolte à la fin de la première année pour extraire qu'elle contient. La culture de la betterave a connu un progrès considérable au cours des trente dernières années.

La betterave sucrière ne présente pas de véritables stades morphologiques lors de la première année de croissance. On distingue deux grandes périodes de croissance au cours de cette année de mise en réserve : la période juvénile et la période d'adolescence (Caneill, 1994).

Première année, phase végétative : développement des feuilles et constitution de la racine charnue, accumulation de réserves en sucre, c'est aussi la phase de culture ;

Deuxième année : montaison et floraison, production de graines.

Toutefois, les étapes de développement de la betterave à sucre sont comme suit :

- **Germination et levée :** Elle s'étale du semis à l'apparition des feuilles cotylédonaire. La plante utilise les réserves de la semence durant cette phase et puise dans le milieu environnant l'eau et l'oxygène. La germination demande une humidité de 12 à 21% selon Stout *et al.* (1956) cités par Draycott (1992) et une température minimale de 4 à 5°C Ledent (1988). Cette température doit varier entre 7 et 10° C pour Doorenbos et Kassam (1980). Ces températures dépendent des variétés utilisées et de leurs localités. La température optimale est d'environ 25°C et la phase germination- levée nécessite 125 degrés jours (Moule, 1972). Veverka (1983) a rapporté que les graines de betterave à sucre sont très sensibles aux fortes humidités. La phase d'implantation est déterminante pour le rendement vis-à-vis de la maîtrise de l'élaboration du rendement. Toutefois, l'apparition des conditions hypoxiques dans le lit de semences se pose particulièrement pour cette culture (Richard *et al.*, 1988).
- **La décortication ou mue du pivot :** Cette évolution débute au stade 2 feuilles et se termine au stade 12-16 feuilles. Elle est caractérisée par le grossissement du pivot. Pendant cette phase, les plantes sont très sensibles aux maladies cryptogamiques et aux fortes pluies. Il faut également mentionner que c'est au cours de cette phase que l'on procède au démariage. En fait, pour la betterave multigerme, les glomérules de betterave à sucre sont formés d'une petite masse difforme de liège enfermant une, deux ou trois graines. Ces glomérules sont semés par poquet (4 à 5 graines), ces graines rapprochées lèvent ensemble rendant nécessaire l'opération du « démariage » qui consiste à éliminer la ou les plantules en surnombre. Le démariage est réalisé manuellement, au stade deux feuilles vraies, en imposant une densité de peuplement pour éviter la compétition intraspécifique.
- **La tubérisation et la formation du bouquet foliaire :** c'est une phase de croissance active durant laquelle le nombre de feuilles peut atteindre 35 à 60 feuilles par pied en fonction de l'année, de la variété utilisée et du lieu considéré (Knudsen, 1988), des racines plus robustes se développent à des profondeurs élevées jusqu'au sous-sol : le pivot peut atteindre 1.2 à 1.5 m de profondeur (Pressurot, 1997).

- **La maturation de la betterave sucrière :** Deux périodes sont à distinguer durant cette phase dont la première est caractérisée par un arrêt de croissance des feuilles, ce qui correspond à l'atteinte du LAImax, tandis que la racine et la teneur en sucre continuent d'augmenter à faible vitesse. La deuxième période, par contre est caractérisée par un arrêt de la photosynthèse et la betterave atteint son taux de sucre maximal. On peut dire, à ce stade, que la betterave est arrivée à maturité et doit être récoltée. A ce moment les feuilles jaunissent et ont un port retombant.

## **Impacts des facteurs climatiques sur la croissance de la betterave**

### **Effet de la température**

La betterave à sucre a besoin de 2400 à 2600 degrés jours pour accomplir son cycle (Christmann, 1983) probablement en base zéro. La germination débute aux environs de 5°C et augmente à peu près linéairement jusqu'à 28 °C et puis diminue. Les basses températures affectent la morphologie des feuilles et entraînent une diminution de la surface foliaire et du poids final. Les températures maximales les plus favorables à la croissance sont comprises entre 20°C et 28°C. Les températures élevées, par contre favorisent davantage la transpiration que la photosynthèse et entraînent par la suite la chute du poids (matière sèche totale) et la teneur en sucre. Au Maroc, les températures estivales élevées constituent le facteur le plus limitant du rendement sur pied de la betterave et imposent les dates limites de récolte. (Papy, 1973).

Par ailleurs et quant la betterave est au stade 6 feuilles, l'action d'une basse température (5°C) pendant au moins 30 jours peut induire une montée à graine. La plante ayant subi un effet vernalisation développe une hampe florale au lieu de développer la racine qui reste fibreuse et ne grossit pas, ce qui affecte le poids des pieds de betterave.

### **Effet de la lumière**

La betterave sucrière requiert une luminosité dont l'intensité est relativement élevée. Selon Ulrich (1952) cité par Pressurot (1997), le poids et la quantité du sucre de la BAS doublent quasiment lorsque la durée du jour passe de 8 à 10-14 heures/jour. Aussi, Milford (1973) a montré que les intensités lumineuses élevées augmentent la surface foliaire et le rendement sucre. L'utilisation de l'énergie lumineuse est dépendante des caractéristiques du feuillage, de

la durée et de la phase culturale dans l'année. Plus le feuillage est dressé, mieux est l'interception de la lumière.

### **Les besoins en eau de la betterave à sucre**

Les besoins en eau de la betterave à sucre varient de 400 à 500 mm dans les régions humides à 500-700 mm dans les régions arides (Sugarbeets, 1972). Soltner (1999) note que ces besoins en eau varient de 600 à 700 mm pour les régions betteravières françaises. Corlier (1975) souligne que pour le périmètre du Doukkala à influence océanique au Maroc, l'ETR de la BAS varie de 750 à 900 mm.

La betterave sucrière prélève les deux tiers de ses besoins totaux en eau dans les couches supérieures du sol (0-40 cm) et seulement un tiers dans les couches profondes (jusqu'à 1.5 m de profondeur). Pour obtenir de bons rendements, il est donc nécessaire de maintenir une quantité adéquate d'humidité dans les 60 premiers centimètres du sol (Sugarbeets, 1972, Erie et French, 1968).

Selon Soltner (1999), la betterave résiste à des périodes de sécheresse sans cependant préciser de quelles périodes il s'agit et ajoute que la croissance ralentit avec la sécheresse et reprend avec le retour de la pluie.

Bazza *et al.*, (1990) relevent que pour le cas du Gharb, la betterave à sucre obtient les meilleurs rendements en sucre pour une irrigation conduite à 80% de l'évaporation du bac.

### **La fertilisation de la betterave sucrière**

La fertilisation est considérée comme étant l'un des facteurs qui influencent les rendements de la betterave à sucre dans le Gharb. Par manque de références sur les caractéristiques physico-chimiques des principaux types de sol de la plaine du Gharb, une seule formule pour tout le périmètre continue d'être recommandée à savoir : 450 kg/ha de 13-26-13 (NPK) plus 300 kg/ha d'ammonitrate ou 200 kg/ha d'urée (Bousraref, 1999).

### **L'azote**

L'azote joue un rôle essentiel dans la synthèse de la matière vivante à partir de la matière minérale. Dans le protoplasme des cellules, il est combiné avec d'autres éléments fondamentaux pour former les substances organiques azotées, les protéines. Il est un des

principaux constituants de la chlorophylle, qui commande l'opération fondamentale de la photosynthèse.

L'azote représente la clé de la fertilisation minérale de la betterave sucrière. Il contribue significativement à l'amélioration du rendement mais une forte quantité ou un apport tardif engendre une réduction du taux de sucre au profit des protéines (Papy, 1973, Doorembos et Kassam, 1980, Carter, 1987). La gestion de l'azote est capitale pour la culture de la betterave à sucre. D'une part, l'application de la dose suffisante permet d'optimiser le rendement sucre à l'hectare, mais aussi, dans le cadre d'une production énergétique, d'en maximiser l'efficacité. Pour cela, une technique se développe dans toutes les régions de production betteravière françaises et est testée depuis plus de 15 ans par l'ITB : la localisation de l'engrais liquide à proximité de la ligne de semis. La technique de localisation de l'azote au semis présente plusieurs avantages. Tout d'abord, elle améliore la disponibilité de l'engrais. C'est en début de végétation, juste après le semis, que la plante a le plus besoin d'engrais. Or, les racines n'ont à ce stade qu'une exploration limitée au profil. Il est donc important que l'azote soit situé à proximité de la plante. Une réduction de dose peut aller de 15 à 30 Unités ce qui constitue une économie non négligeable (Cariolle, 2007). Pour Favre *et al.*, (2006) la norme de fumure pour la betterave est passée de 130 à 100 kg N/ha en Suisse et les répercussions directes de la qualité des betteraves sur leur valeur commerciale incitent effectivement les agriculteurs à diminuer le risque de dépréciation en pratiquant une fertilisation proche de la norme de base. Suite aux résultats de recherche menées par le CTCS, la dose optimale en azote pour la betterave à sucre dans le Gharb est de 120 à 150 kg/ha (Ennahari *et al.*, 1999).

## **Le phosphore**

Le phosphore agit sur l'élongation et le diamètre de la racine. La betterave exporte des quantités importantes en phosphore. La fumure phosphatée permet d'augmenter le rendement et la production du sucre brut et extractible. Les exportations de la betterave à sucre sont estimées à 1kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> par tonne de racine. La dose en phosphore préconisée pour le Gharb est d'environ 50 à 80 kg/ha (Ennahari *et al.*, 1999).

## **Le potassium**

Le potassium est très important pour son rôle de régulateur et d'activateur de certaines enzymes dans les processus métabolique de la plante. Il active les réactions biochimiques du transport du sucre des feuilles jusqu'au pivot. Les recherches menées par le CTCS et l'IAV Hassan II ont montré que les sols du Gharb sont suffisamment fournis en cet élément et que la fumure potassique serait sans effet.

### **c: Conduite de essais à la SEHA de Souk Tlet**

Les dates de semis ont été le 28/01/2004, le 20/11/2004 et le 27/10/2005. La variété utilisée est une multigerme Deprez poly. Le semis est effectué manuellement avec 4 à 5 graines par poquet soit une dose de semis d'environ 10 kg/ha. L'écartement entre poquets est de 20 cm et l'écartement entre lignes de betterave à sucre est de 50 cm correspondant à trois lignes de betterave à sucre entre deux raies. Les parcelles ont bénéficiés chaque année d'un labour profond, deux covercroppages, d'apports d'engrais de fond (450 kg/ha du NPK) et de couverture (200 kg/ha de l'Urée 46%). Le démarriage qui reste une opération très importante pour la betterave multigerme est réalisé pour laisser une plantule par poquet généralement la plus vigoureuse. La culture a nécessité 2 à 3 binages par campagne, plusieurs désherbages, et les traitements phytosanitaires pour la lutte contre les ravageurs et les champignons. Les dates de récoltes ont été respectivement le 03/08/2004, le 10 /07/05 et le 20/06/06. Il convient d'indiquer que les parcelles objet des expérimentations avaient été précédemment emblavées en canne à sucre laquelle a été dessouchée au courant de l'été 2003. Les souches de cannes n'ayant pu se dégrader rapidement la première campagne, ont conféré aux parcelles des conditions particulières durant la campagne 2003/04.

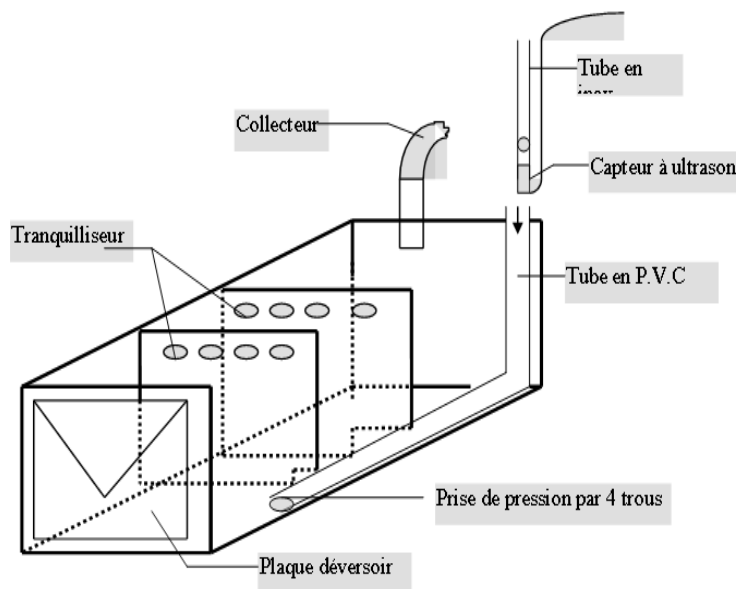
#### **II.8.4. Observations réalisées**

La station expérimentale de Souk Tlet dispose au niveau de son parc agro-météorologique d'une station complète du type Campbell pour la mesure des paramètres tels que la température, l'humidité relative de l'air, le rayonnement et la vitesse du vent qui sont enregistrés au pas de temps horaire. Ces données sont nécessaires pour la détermination de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  selon la méthode de Penman-Monteith (Smith, 1992). Les précipitations sont recueillies au niveau d'un pluviographe à auget basculant et les mesures sont effectuées avec un pas du temps de 15 min.

- Mesures effectuées durant la période hivernale au niveau des parcelles expérimentales

#### a) Hydrauliques et hydrologiques

Les débits de ruissellement de la parcelle nivelée dotée de raies sont mesurés automatiquement dans un bac déversoir situé à son exutoire (Figure 10) où s'effectuent des mesures limnimétriques par sondes ultrasoniques. Le bac déversoir en béton a été installé en 2004 avec le concours du Cemagref d'Anthony. Cet ouvrage de mesure a été spécifiquement mis en place pour cette expérimentation selon des critères techniques détaillés dans Chaumont *et al.*, (1999). Le déversoir a été étalonné et calibré.



**Figure 10.** Dispositif de mesure des eaux de ruissellement de la parcelle nivelée disposant de raies (Chaumont *et al.*, 1999)

Le débit est mesuré par un bac déversoir de forme parallélépipédique de longueur 1 m et de hauteur 0.40 m. Sur sa largeur frontale, il est muni d'un déversoir triangulaire de 0.28 m de hauteur. L'angle d'ouverture du déversoir est de 10 degrés.

La hauteur d'eau transitant au-dessus du déversoir est mesurée à l'aide d'un capteur à ultrasons immergé dans le bac. Le principe de ce capteur repose sur l'émission d'ondes ultrasoniques à la base de la colonne d'eau et la mesure du temps d'un aller et retour de ces ondes entre le capteur et la surface libre du liquide.

Concernant le drainage, nous rappelons que les trois parcelles d'étude sont équipées d'un système de drainage enterré. Le drainage est mesuré selon le même principe que pour le ruissellement. Toutefois, les travaux antérieurs réalisés par Bouarfa *et al.*, (2002) et Hammani (2002) ont conclu que la transmissivité élevée expliquait de fortes interactions entre parcelles. Le drainage souterrain a un effet à l'échelle de la station et non à l'échelle parcellaire. De ce fait, le drainage souterrain n'est pas discriminant d'une parcelle à une autre. Seul le ruissellement sera pris en compte comme un terme discriminant les conditions d'humidité de surface des trois parcelles.

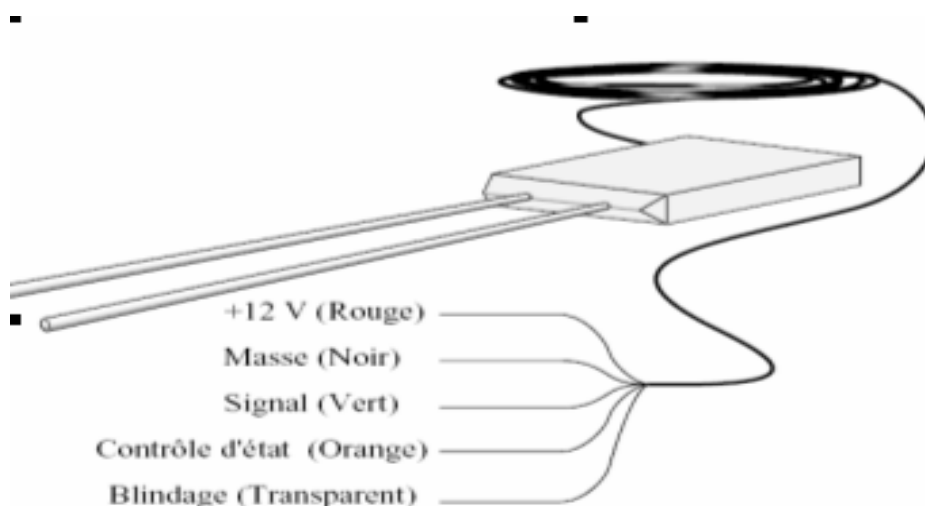
La profondeur de la nappe facile à mesurer est souvent utilisée comme variable pour expliquer la croissance de cultures et les rendements (Cavazza and Rossi Pisa, 1988 ; Kanwar *et al.*, 1988 ; Pons, 1998 ; Schaffer *et al.*, 1987) cités par Brisson *et al.*, (2002). Ainsi, un suivi de l'évolution de la nappe phréatique a été assuré au moyen de deux piézomètres installés sur chacune des parcelles (1 en amont et 1 en aval de chaque parcelle nivelée) et un au point haut et au point bas de la parcelle non nivelée. Les piézomètres utilisées sont des tubes en PVC de 3 m de longueur et perforés à leurs base sur environ 1 m. Ils sont installés à une profondeur de 2.5 m. La mesure s'effectue manuellement à l'aide d'une sonde lumineuse au pas de temps journalier.

#### **b) Etat de l'humidité du sol**

La tension de l'eau dans le sol est mesurée sur chaque parcelle par tensiométrie à multi manomètres à mercure, placés à : 10, 20, 40, 60, 80, 100 et 150 cm de profondeur. Les relevés sont manuels et effectués au pas de temps journalier.

La teneur en eau du sol est mesurée selon deux méthodes. La première par gravimétrie où des prélèvements des échantillons à la tarière sont réalisés à des pas de temps décadaires au niveau des différents sites de mesures. La seconde, basée sur l'utilisation des sondes TDR placées à des profondeurs de 5 et 10 cm sur les deux parcelles. Les enregistrements se font à des pas de temps de 15 min.

La sonde utilisée est du type CS615. Il s'agit d'un reflectomètre de teneur en eau qui mesure la teneur volumique en eau en utilisant la méthode TDR (Time Domain Reflectometry)



**Figure 11.** Capteur TDR

Source : Campbell Scientific (1999)

Le reflectomètre est composé de deux tiges (Figure 11) en acier connectées à un circuit imprimé. Un câble blindé à 4 fils est connecté à ce circuit imprimé afin d'alimenter le capteur, de commuter l'alimentation et de mesurer le signal de sortie. Le circuit imprimé est enrobé dans un bloc epoxy. Ce reflectomètre utilise la méthode TDR dans le but de déterminer la teneur en eau suite aux modifications de la constante di-électrique, qui influence la vitesse de propagation des ondes le long des tiges. Le signal qui en résulte est transmis à une centrale de stockage et d'acquisition du type Campbell puis converti en teneur volumique en utilisant l'équation d'étalonnage. Les mesures ont été faites à des pas de temps du quart d'heure. Ensuite ces données sont transférées pour exploitation par le biais d'un micro-ordinateur portable.

Deux sites ont été instrumentalisés pour le soin de cette recherche (1 site amont et un site aval de la parcelle) et deux profondeurs à savoir 5 et 10 cm ont été retenues pour l'installation des tiges.

### **c) Mesures agronomiques**

Le LAI (Leaf Area Index) est un paramètre important qui caractérise la croissance des cultures. Un intérêt particulier est accordé à sa mesure compte tenu des relations qui le lie à la plante et sa croissance. (Goudriann and Van Laar, 1994 ; Tsialtas *et al.*, 2008). Il est défini comme étant le rapport de la surface des feuilles par unité de surface de sol.

Les racines sont des organes qui enregistrent et transmettent un ensemble d'informations liées à l'absence ou à la présence des contraintes hydriques et édaphiques. Outre, les aspects

d'ancrages dans le sol, elles assurent les fonctions de nutrition et d'extractions de l'eau. La compréhension de leur fonctionnement et de leur réponse à une contrainte donnée est une étape essentielle pour l'étude de fonctionnement de la plante entière (Rebiere, 1996). L'enracinement maximal et la répartition racinaire horizontale et verticale ont été déjà déterminés sur le site expérimental sur le traitement conduit à l'ETM et le traitement en sec (Pressurot, 1997). La description du profil a été effectuée sur un plan vertical divisé en mailles de 5 cm de côté. Cette méthode adoptée par Tardieu et Manichon (1986) est citée par Pressurot (1997). Il en ressort que pour le traitement conduit à l'ETM, le système racinaire atteint 1.15 cm contre 1.50 cm pour le régime conduit en sec. Concernant, les parcelles soumises à l'engorgement, il est difficile d'appréhender la profondeur racinaire. Les conditions d'engorgement ne sont pas les mêmes et d'autre part, il est plus difficile de faire la part des choses entre les racines nécrosées, partiellement atteintes par la contrainte d'excès d'eau. C'est pour cela, que nous allons nous limiter à la longueur du pivot. Nous convenons que pour la betterave à sucre, le pivot est un organe de stockage du sucre. La betterave à sucre est principalement cultivée pour le pivot dont on extrait du sucrose, lequel est transformé en sucre raffiné destiné à la consommation humaine.

Compte tenu de l'importance de ces deux paramètres (LAI et pivot) dans la croissance de la culture notamment pour une betterave à sucre et afin d'analyser l'impact des excès d'eau sur le développement et le rendement de la betterave à sucre, ils ont fait l'objet d'un suivi durant tout le cycle cultural. Ainsi, nous avons procédé à la détermination du LAI par la méthode planimétrique et à la mesure de la longueur du pivot sur 8 betteraves (amont, milieu et aval parcelles nivelées) et 8 betteraves (points hauts et points bas) de la parcelle non nivelée et ce, tous les 15 jours environ durant le cycle de la culture. Le diamètre de la racine de l'ordre du millimètre n'est pas pris en considération pour la mesure. Cette méthode directe bien que destructive (arrachage des betteraves, etc) est très consommatrice en terme de temps et de logistique à mettre en place mais reste efficace et assez précise à notre sens.

- **Mesures effectuées durant la période des irrigations**

- a) Contrôle des débits en colature pour la parcelle gravitaire**

Les irrigations étaient conduites par poste d'environ une vingtaine de raies chacun. Nous avons opté pour le mode d'irrigation avec des raies ouvertes à l'aval. Cette pratique d'arrosage présentait des efficacités satisfaisantes dans le contexte du Gharb (Mailhol *et al.*, 1999). Deux seuils de mesures, ont été installés par poste d'irrigation pour le contrôle des débits de colatures à l'extrémité des parcelles dans le cas où on procéderait à des tests d'arrosages en raies ouvertes. Il a été ajouté un seuil de type RBC facilement déplaçable pour contrôler la valeur du débit stabilisé sur les autres raies du poste. Ce même type de dispositif a été également mis en place pour contrôler les débits amont. Au départ les mesures sont fréquentes (toutes les 5 minutes pendant le premier quart d'heure) puis chaque 20 à 30 minutes ou plus et ce, jusqu'à la fin des arrosages. Pour les conduites en raies bouchées, et afin de mesurer la valeur du débit stabilisé, un seuil de type Parshall a été mis en place sur une raie laissée ouverte également contrôlée en amont.

- b) Suivi de l'avancement**

Pour prendre en compte la variabilité spatiale des temps d'avancement du front d'eau celui-ci est suivi sur tout le poste, au cours d'un même arrosage. Pour ce faire, deux rangées de jalons espacés de 25 m, bien visibles, ont été installées par poste. Chaque rangée permet le suivi de l'avancement d'une douzaine de raies ( $\approx 6$  de part et d'autre).

Les temps sont obtenus à l'aide de chronomètres déclenchés dès que l'eau a traversé les seuils de mesure amont. Ils sont notés sur une fiche type de suivis d'arrosage élaborée à cet effet.

En plus des mesures spécifiques à cette période portant sur l'évaluation des doses d'eau d'irrigation apportées à chaque parcelle et à chaque irrigation, les mesures relatives à l'estimation de l'évapotranspiration, au suivi de l'humidité du sol et des paramètres agronomiques ont été effectuées au long du cycle.

### **Détermination des rendements**

Trois plans d'échantillonnage ont été utilisés (un pour chaque parcelle) consistant à diviser la surface étudiée en zones d'influence égales et disjointes de 2 m<sup>2</sup>. Pour la partie dont les irrigations sont supposées être conduites sans restriction hydriques, 5 placettes en amont, 5 au milieu et 5 en aval ont été choisies aléatoirement au niveau des parcelles de chacune des

parcelles nivelées Pnivraies et PnivsansR. En ce qui concerne la parcelle Psansniv, 5 placettes situées dans les dépressions et 5 dans les points hauts ont été choisies aléatoirement.

Par ailleurs, pour la conduite en pluvial (conduite en sec ou en non irriguée, 3 placettes amont, 3 au milieu et 3 en aval ont été choisies aléatoirement sur chacune des deux parcelles nivelées Pnivraies et PnivsansR. Concernant la parcelle Psansniv, 3 placettes situées dans les dépressions et 3 dans les points hauts ont été choisies aléatoirement.

Afin d'analyser la richesse en saccharine relative à la conduite sans restriction, 9 échantillons de la parcelle Pnivraies et 9 de la parcelle PnivsansR (3 en amont de parcelle, 3 au milieu et 3 en aval) et 6 échantillons de la parcelle Psansniv (3 échantillons prélevés dans les dépressions et 3 au niveau des points hauts) ont été collectés. Pour la partie conduite en pluvial, 18 échantillons ont été prélevés (6 pour chacune des parcelles nivelées et 6 pour la parcelle non nivelées (3 points hauts et 3 points bas).

### **Impact de la submersion**

Il est difficile d'appréhender en plein champ l'effet de la submersion sur les graines et les plantules de la betterave à sucre. Les conditions et les durées de submersions étant difficilement maîtrisables. Par ailleurs et à des fins d'adaptation d'un modèle de culture à la problématique de la submersion, des expérimentations en pots pour mettre en relation les durées de submersion et la mortalité des graines et des plantules ont été réalisées. Le suivi des pots présente l'avantage de mieux maîtriser les conditions de drainage contrairement à un essai réalisé en plein champ.

Vingt-cinq pots ont été utilisés pour la submersion des graines de la même variété utilisée en expérimentation de plein champ et 25 pots pour la submersion des plantules. Les durées retenues pour la submersion des graines étaient de 1, 4, 8, 10 et 15 jours où on décomptait quotidiennement les nombres de graines germées après avoir été soumises à la submersion. Les durées retenues pour la submersion des plantules étaient de 4, 8, 10, 15 et 20 jours où l'on décomptait les plantules asphyxiées suite à la submersion. Les pots destinés à la submersion des plantules n'avaient subi aucune contrainte de stress d'excès d'eau au préalable de l'expérimentation (durant la phase germination-levée).

Cinq pots ont été utilisés pour chacune des durées de submersion avec respectivement 20 graines ou 20 plantules par pot. Le stade plantule est défini dans le cadre de cette expérimentation comme étant celui correspondant à 6 feuilles vraies.

## II. 9. Expérimentations chez les agriculteurs

Afin de tester le dispositif expérimental, dans le contexte réel de son utilisation, des essais ont été conduits en 2005/06 chez les agriculteurs. Deux agriculteurs relevant des CDA 233 et 238 ont été retenus pour l'expérimentation. Ces agriculteurs ont été choisis pour leur réceptivité, leur proximité de la SEHA de Souk Tlet (situés dans un rayon de 5 km) pour pouvoir utiliser les données agrométéorologiques de la station et facilités d'accès pour permettre aux techniciens et autres agriculteurs de la région de visiter les essais (Annexe I). Il a été convenu avec les deux agriculteurs de ne pas changer leur façon de conduire la betterave à sucre. Les interventions opérées sur les parcelles sont les suivantes :

### **Parcelle agriculteur (cas du gravitaire)**

La parcelle retenue pour l'expérimentation est située sur la sole A du Bloc 60 du secteur gravitaire C2. Ce secteur a été aménagé au début des années 80. La trame d'aménagement adoptée est du type « B ». La superficie concernée par l'essai fait environ 1.5 ha. L'opération du nivellement a eu lieu le 27/10/05 selon une pente de 0.2%. La parcelle est dominée en tête par un arroseur en terre. Cet ouvrage totalement dégradé par les années de mise service a été repris dans le cadre de cette expérimentation le 29/10/05. Après recalibrage, il permet de disposer d'une charge de 30 cm pouvant dominer la parcelle gravitairement. Cet arroseur peut assurer le transit sans débordement d'un débit équivalent à 30 l/s correspondant à la main d'eau généralement accordée dans ce type de secteur. L'arroseur est alimenté à partir d'une prise modulée sur le canal tertiaire avec un débit de 30 l/s.

On a ensuite procédé au labour profond (30 cm) dès la récolte du précédent cultural (blé) à l'aide d'une charrue à disque, suivi de deux passages de covercrops le 30/10/05, après la mise en place de l'engrais de fond (400 kg/ha d'engrais composés). Le traçage des raies a été réalisé le 03/11/05 et le semis le 05 et 06/11/2005. Le semis a été effectué manuellement, par poquet, l'écartement entre ligne était de 50 cm et entre poquet de 20 cm avec une dose de semences d'environ 12 Kg/ha. Au niveau fumure, 63 Unités d'azote, 126 Unités de  $P_2O_5$ , 63 Unités de  $K_2O$  et 300 kg d'ammonitrate comme engrais de couverture ont été apportés. Malgré les recommandations de l'ORMVAG, les agriculteurs apportent toujours du potassium. La variété semée est Ténor, qui est une multi germe. Au niveau des traitements insecticides, une application du Carbofuran et du Mercaptodiméthure a eu lieu lors du semis, et une application à l'hydroxyde de cuivre a eu lieu le 05/12/05. Le démariage a eu lieu en janvier 2006. Trois binages-désherbages ont été effectués sur la parcelle.

En matière d'irrigation, la main d'eau a été fractionnée à partir de l'arroseur vers les raies au moyen de siphons tubulaires. Une batterie de 33 siphons a été utilisée lors des deux irrigations apportées durant cette campagne.

### **Parcelle agriculteur (cas de l'aspersion)**

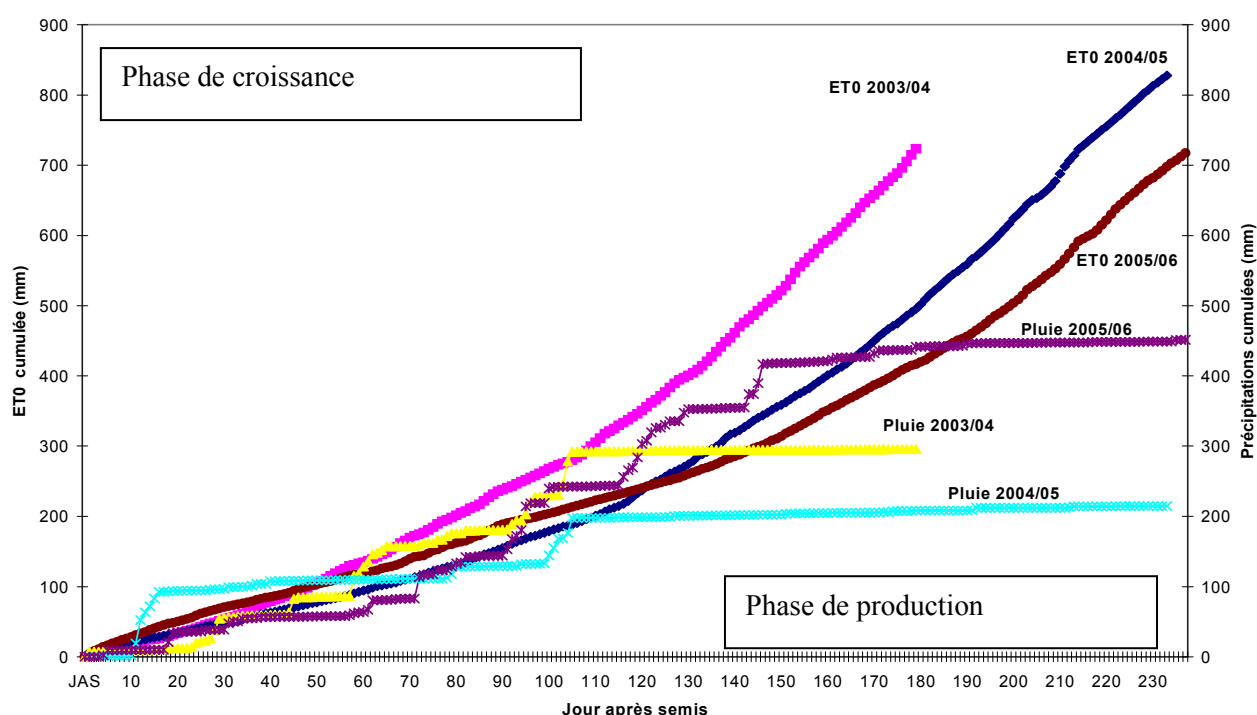
La parcelle retenue pour l'expérimentation est située au Bloc 78 du secteur aspersion C3. Ce secteur a été aménagé au début des années 80. La superficie concernée par l'essai fait environ 1 ha. L'opération de nivellement a eu lieu 28/10/05 selon une pente de 0.2%. La parcelle aspersion est dominée par un quadrillage de 18\*18 m. Les asperseurs ont une pluviométrie de 5.6 mm/h. On a procédé au labour à l'aide d'une charrue à disque sur 30 cm, deux couverts croisés ainsi que la mise en place d'un herbicide de pré-émergence le 28/10/05. Le 29/10/05 on a procédé à la mise en place d'une colature à son aval dans le sens de la pente sur toute la longueur de la parcelle. Il a été procédé à un labour profond avec une charrue à disque sur une profondeur de 30 cm. Après la mise en place de l'engrais composé de fond (450 kg/ha), il a été procédé deux couverts croisés le 05 et 06/11/2005. Le semis a été réalisé manuellement le 07/11/05, par poquet, l'écartement entre ligne est de 50 cm et entre poquet de 20 cm, la densité de semis est d'environ 12 Kg/ha. La variété semée est Polyflor qui est une multigerme. Au niveau des traitements insecticides, une application du Carbofuran et du Mercaptodiméthure a eu lieu lors du semis, et une application à l'hydroxyde de cuivre a eu lieu le 16/11/05. Le désherbage est intervenu deux mois après les semailles, puis trois binages-desherbages ont été opérés sur la parcelle. Deux irrigations ont été apportées au niveau de cette parcelle. La date de la récolte a été le 04 juillet 2006.

## **II.10. Résultats et discussions**

### **II.10.1. Caractérisation climatique : bilans pluie – demande climatique**

Les expérimentations ont porté sur trois années et concernent les campagnes agricoles de 2003/04, 2004/05 et 2005/06. Pour ces trois campagnes, Les  $ET_0$  cumulées (depuis le semis à la récolte de la betterave à sucre) sont de l'ordre de 723, 827 et 717 mm respectivement pour 2003/04, 2004/05 et 2005/06. Les précipitations reçues durant les mêmes périodes sont respectivement de l'ordre de 295, 215 et 451 mm. Compte tenu de ce qui précède et de la date de semis (29/01/04 la première année), (20/11/2004 la deuxième année) et le 27/10/2005 (la troisième année) , on peut conclure que la campagne 2004/05 a été la plus sèche avec un déficit hydrique de 602 mm et que la campagne 2005/06 a été la plus humide avec un déficit hydrique de l'ordre de 256 mm. Cependant, les analyses à l'échelle de la campagne

betteravière masquent la répartition de la précipitation au cours du cycle de la culture. En fait, la Figure 12 montre que quelque soit la campagne agricole la période de croissance de la betterave souffre d'un excédent pluviométrique susceptible de créer les conditions d'engorgement. En fait, les excédents pluviométriques créent souvent des engorgements du fait que les parcelles n'ont été semées qu'après les labours qui ont lieu après les premières pluies (cas de 2003/04 et 2005/06). Par contre lors de la campagne 2005-2006, la betterave a bénéficié d'une irrigation au semis.



**Figure 12.** ET<sub>0</sub> Penman Monteith et pluviométrie cumulée à la station de Souk Tlet

A la lumière de ce qui précède, nous allons nous intéresser à la période allant du semis jusqu'à la fin de la période pluvieuse durant laquelle la pluie excède (en tendance) l'évapotranspiration potentielle. De ce fait, les faibles pluies enregistrées à partir de la deuxième décade d'avril et de mai ne sont pas prises en considération dans l'analyse. Le Tableau 3 synthétise les données climatiques durant la période pluvieuse et indique que la valeur moyenne de l'excédent pluviométrique est proche sur les deux campagnes et supérieur à 3 mm/j mais a lieu sur deux périodes différentes. En revanche les chroniques de précipitations et d'évapotranspiration mettent en évidence la coïncidence entre la période pluvieuse et la période du semis et les premières phases culturales de la betterave à sucre.

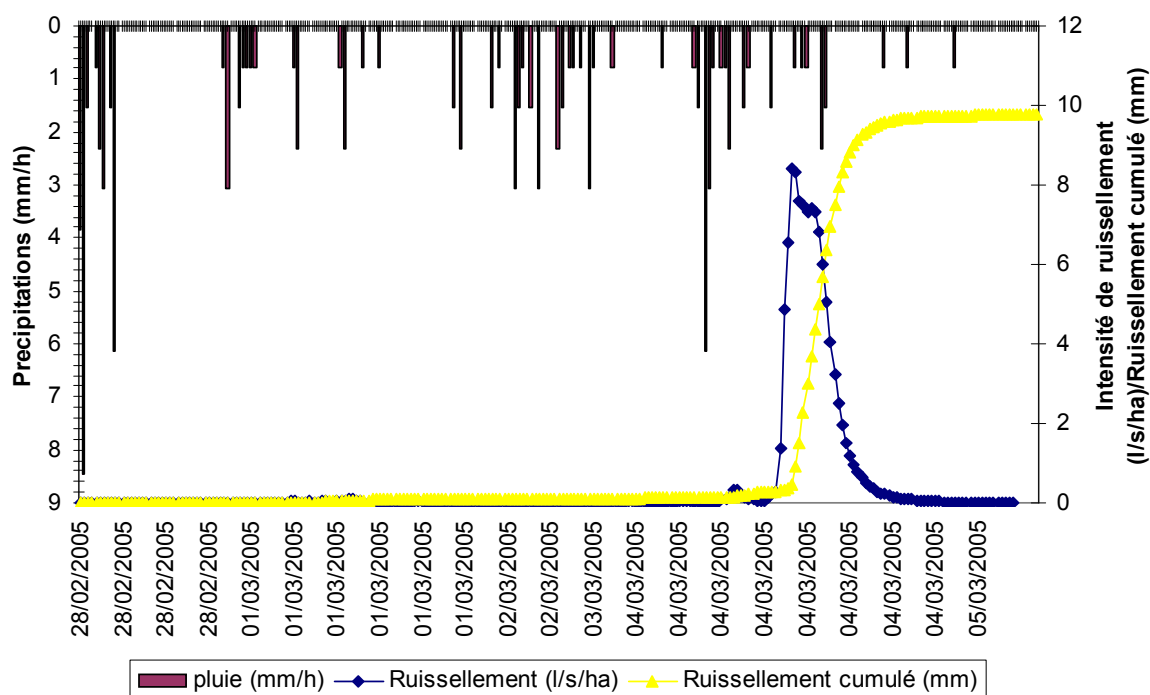
L'excédent pluviométrique précoce de l'année 2004/05 aurait affecté un semis précoce tandis que l'excédent pluviométrique tardif de l'année 2005/06 aurait quant à lui affecter un semis tardif. Quant à la campagne 2003/04, les précipitations présentes depuis le mois de novembre se sont étalées jusqu'au mois de mai 2004 mais avec cependant une faible intensité de 2mm/j dès l'approche du printemps.

**Tableau 3. Bilan pluie -ET**

| Campagne | Date début | Date fin | Nombre de jours | ET <sub>0</sub> (mm) | Pluie (mm) | P-ET <sub>0</sub> (mm) | Intensité nette (mm/j) |
|----------|------------|----------|-----------------|----------------------|------------|------------------------|------------------------|
| 2003/04  | 25/02/04   | 01/04/04 | 43              | 148                  | 303        | 155                    | 3.60                   |
| 2004/05  | 28/10/04   | 05/12/04 | 40              | 36                   | 163        | 127                    | 3.2                    |
| 2005/06  | 28/12/05   | 21/03/05 | 84              | 148                  | 446        | 297                    | 3.58                   |

### II.10.2. Fonctionnement hydrologique et hydraulique du ruissellement

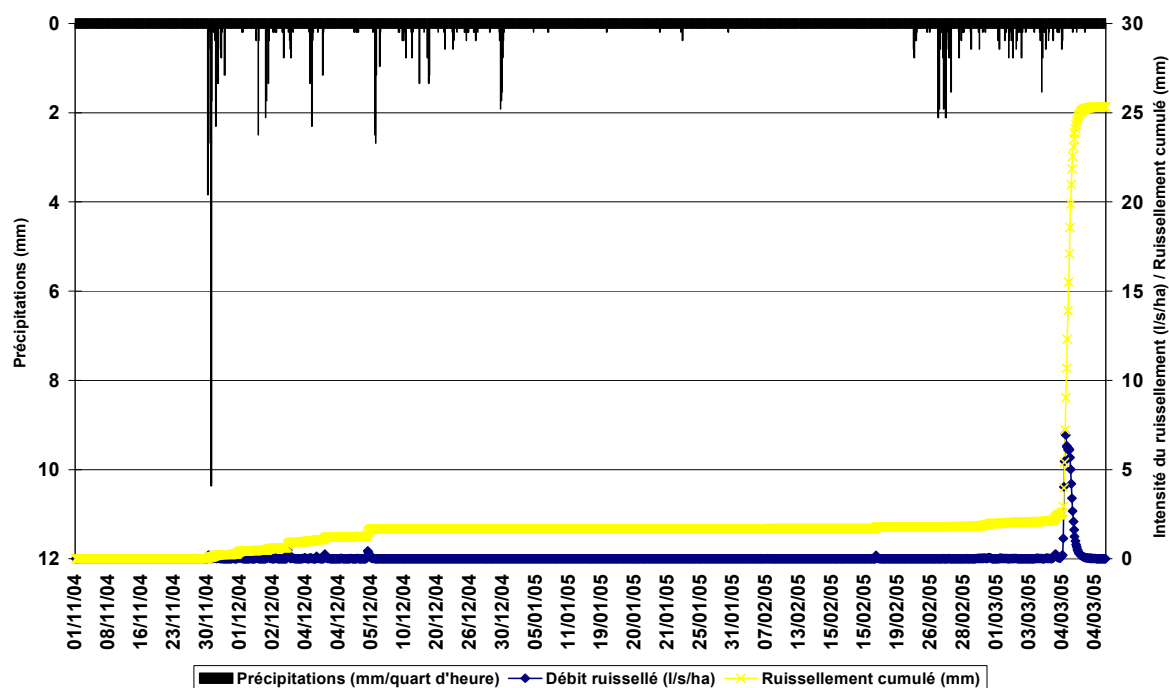
On s'intéresse à l'évaluation des performances des deux parcelles, Parcelle nivelée et dotée de raies (Pnivraies) et parcelle non nivelée (Psansniv), en matière de performances hydrologiques et hydrauliques vis à vis de l'évacuation du ruissellement pluvial. En fait, la parcelle nivelée sans raies (PnivsansR) n'est pas dotée d'ouvrage de mesure du ruissellement. Les raies collectent les eaux de ruissellement et les acheminent vers l'exutoire de la parcelle. Les raies sont espacées de 1.5 m et fonctionnent comme si chaque raie disposait d'un impluvium de 1.5 m de largeur et d'une longueur de 240 m (correspondant à la longueur de la parcelle). Les pluies ne génèrent pas systématiquement du ruissellement (Figure 13). Ceci démontre que toutes les précipitations enregistrées entre le 28/02 et 04/03/2005 ont reconstitué le stock en eau du sol.



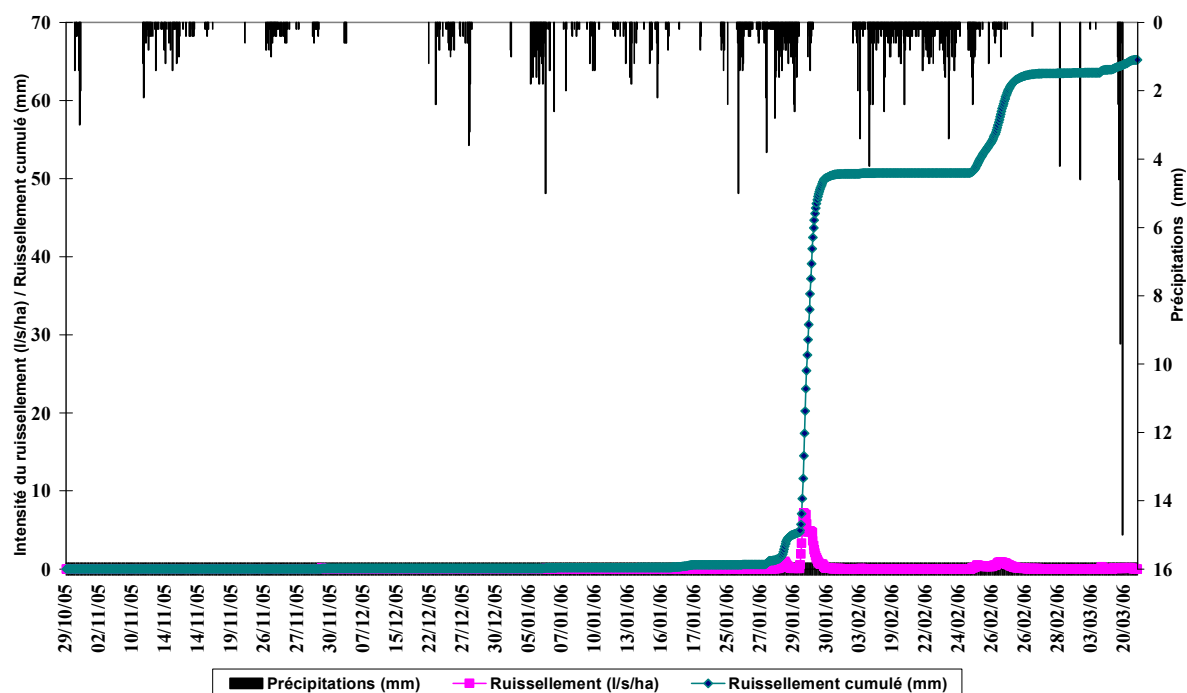
**Figure 13.** Chronique de ruissellement enregistré durant le mois de mars 2005

La pluie sert d'abord à reconstituer le stock en eau du sol et recharge la nappe. En effet, la remontée de la nappe peut être constatée sans qu'il n'y ait ruissellement. D'un point de vue hydrologique, les restitutions du ruissellement déterminées sur la base des volumes cumulés recueillis à l'exutoire de la parcelle par rapport à l'excédent pluviométrique (P-ET0) durant la période s'étalant du semis de la betterave à sucre jusqu'à la fin de la période pluvieuse, à savoir mars 2005 et avril 2006, a mis en évidence que Pnivraies a restitué environ 20 % (25.4 mm) et 22% (65.3 mm) respectivement pour la première et la deuxième campagne (Figure 14 et Figure 15). Bouarfa (2002) et Hammani (2002) ont déterminé des restitutions, émanant du drainage superficiel, variant de 20 à 30 % pour les campagnes 1996/97, 1997/98 et 2000/01 durant les périodes s'étalant de décembre à février. L'hydraulicité de l'année et la demande climatique restent déterminantes pour la variation des restitutions. Les valeurs déterminées pour les campagnes 2004/05 et 2005/06 pour la parcelle Pnivraies, une des grandes parcelles du site expérimental, et qui ne connaît aucun apport d'eau extérieur de ruissellement cadrent avec les valeurs trouvées par les auteurs cités. Au contraire, la parcelle Psansniv n'a enregistré aucun ruissellement et l'excès d'eau généré au niveau des dépressions contribue à des remontées locales de la nappe. En fait, l'excès d'eau dans ce type de parcelle (Figure 7), résulte essentiellement du remplissage des dépressions. Le coefficient de restitution obtenu à l'échelle de la période pluvieuse ne permet pas cependant d'expliquer les facteurs de genèse

de ces excès d'eau. Une démarche analytique fondée sur la confrontation des données issues des différents dispositifs de mesure doit être mise en œuvre pour tenter de comprendre les mécanismes générateurs d'excès d'eau. La détermination du coefficient du ruissellement au niveau de chaque événement participe en partie à cette démarche.



**Figure 14.** Evolution du ruissellement instantané et cumulé en fonction des précipitations au cours de la campagne : 2004/05



**Figure 15.** Evolution du ruissellement instantané et cumulé en fonction des précipitations au cours de la campagne : 2005/06

Le coefficient de ruissellement a été déterminé en isolant le volume ruisselé et l'événement pluviométrique l'ayant généré. Plusieurs événements pluvieux n'ayant pas généré de ruissellement n'ont pas été intégrés dans cette analyse même s'ils peuvent contribuer efficacement à la genèse du ruissellement par la recharge des couches du sol. Plusieurs d'épisodes entre 2005 et 2006 ont pu être identifiés. La synthèse est donnée par le Tableau 4 :

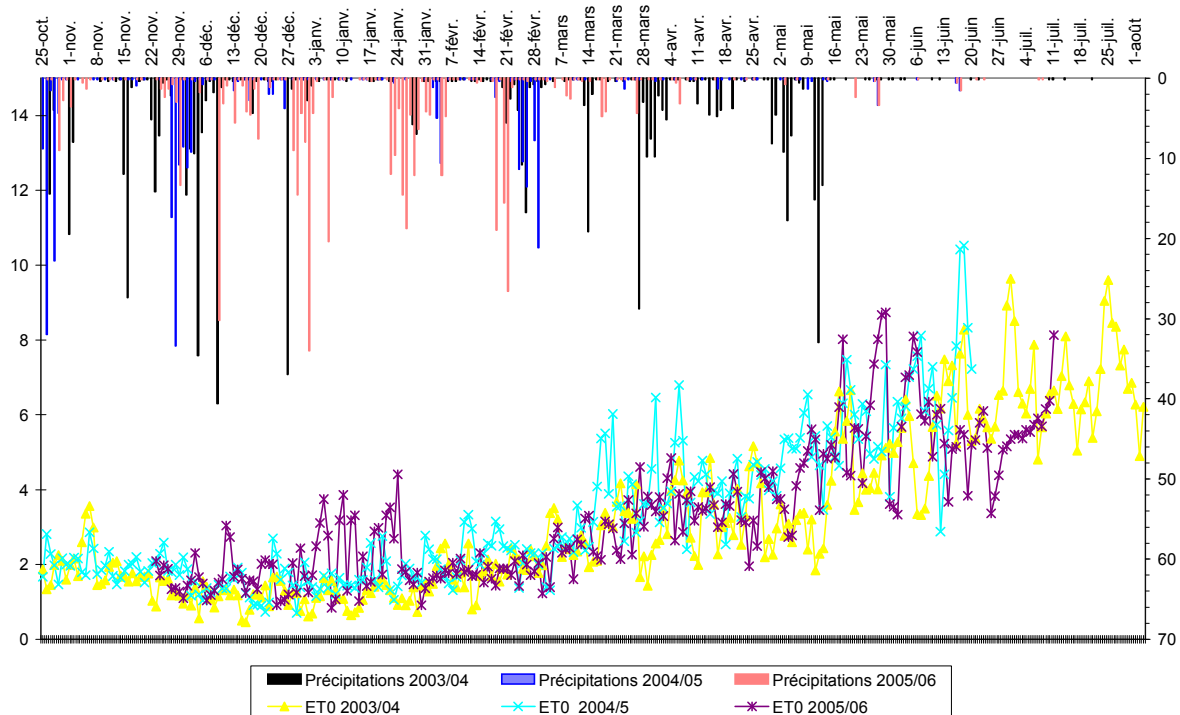
**Tableau 4.** Coefficient du ruissellement de la parcelle nivelée dotée de raies

| Episode    | Volume précipité<br>(m3) | Volume ruisselé<br>(m3) | Rapport<br>(VR/VP)<br>en % |
|------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 04/03/2005 | 490                      | 99                      | 20                         |
| 16/01/2006 | 70                       | 1                       | 1                          |
| 30/01/2006 | 350                      | 125                     | 36                         |
| 25/02/2006 | 172                      | 31                      | 19                         |
| 04/03/2006 | 100                      | 3                       | 3                          |
| 21/03/2006 | 103.5                    | 68                      | 65                         |

Le coefficient du ruissellement constitue le rapport entre le volume recueilli à l'exutoire et le volume précipité. Il ressort du Tableau 4 que des volumes importants de précipitations (490 m3) génèrent un ruissellement de 99 m3 soit un coefficient de 20% qui reste inférieure à celui

de l'événement du 21/03/06. Ceci peut s'expliquer par la teneur en eau du sol. Chahinian *et al.* (2005) ont en effet relevé que des événements pluvieux de hauteurs variant du simple au double avec des intensités du même ordre, produisent des coefficients de ruissellement similaires. Ceci s'expliquait par l'état de l'humidité initiale du sol. La teneur en eau du sol antécédente pour la génération du ruissellement a été mise en lumière par plusieurs auteurs (Karnieli and Benasher, 1993 ; Ceballos and Shnabel, 1998). Castillo *et al.*, 2003 notent que cette teneur en eau du sol est reconnue comme l'un des facteurs contrôlant le ruissellement dans les environnements semi-arides. Des débits de 7 l/s/ha ont été enregistrés. Les colatures censées recueillir les eaux des parcelles des agriculteurs sont dimensionnées pour un débit de 2 l/s/ha

Le nivellement et la mise en place des raies permettent d'évacuer rapidement entre 20 et 65% des volumes recueillies par les précipitations. Cela témoigne de l'efficacité du ruissellement par ce type de transformations des conditions de surface. Ces pourcentages confirment l'intérêt du drainage de surface et corrobore l'une des principales conclusions des travaux effectués au Gharb par Bouarfa (2002) et Hammani (2002). Durant la période hivernale, les deux mécanismes de ruissellement, sur surface non saturée ( $P(t) > \inf(t)$ ) : du type Horton (1933) et sur surface saturée : du type Dunne et Clark (1970), sont susceptibles de se produire. Le ruissellement sur surface saturée peut aussi apparaître lorsque la nappe est proche de la surface du sol. Le ruissellement enregistré à la fin de janvier 2006 peut être expliqué par la présence de la nappe qui avoisine la surface du sol (Figure 18). Les épisodes enregistrés durant mars 2005 et mars 2006 survenant à une période où la demande climatique connaît une augmentation notoire (Figure 16) :



**Figure 16.** Evolution des précipitations et de l'évapotranspiration durant le cycle de la betterave à sucre

avec pour conséquence un rabattement du niveau de la nappe (Figure 18). C'est dans ce cas un schéma Hortonien qui expliquerait l'occurrence de ces épisodes.

Les sols argileux lourds du Gharb affichent une capacité de stockage jusqu'à saturation très importante avoisinant 500 mm sur une profondeur de 1.4 m (celle correspondant à la profondeur des drains). En comparant l'évolution du stock hydrique sur la profondeur précitée durant la campagne 2005/06 (Figure 18), calculé comme suit :

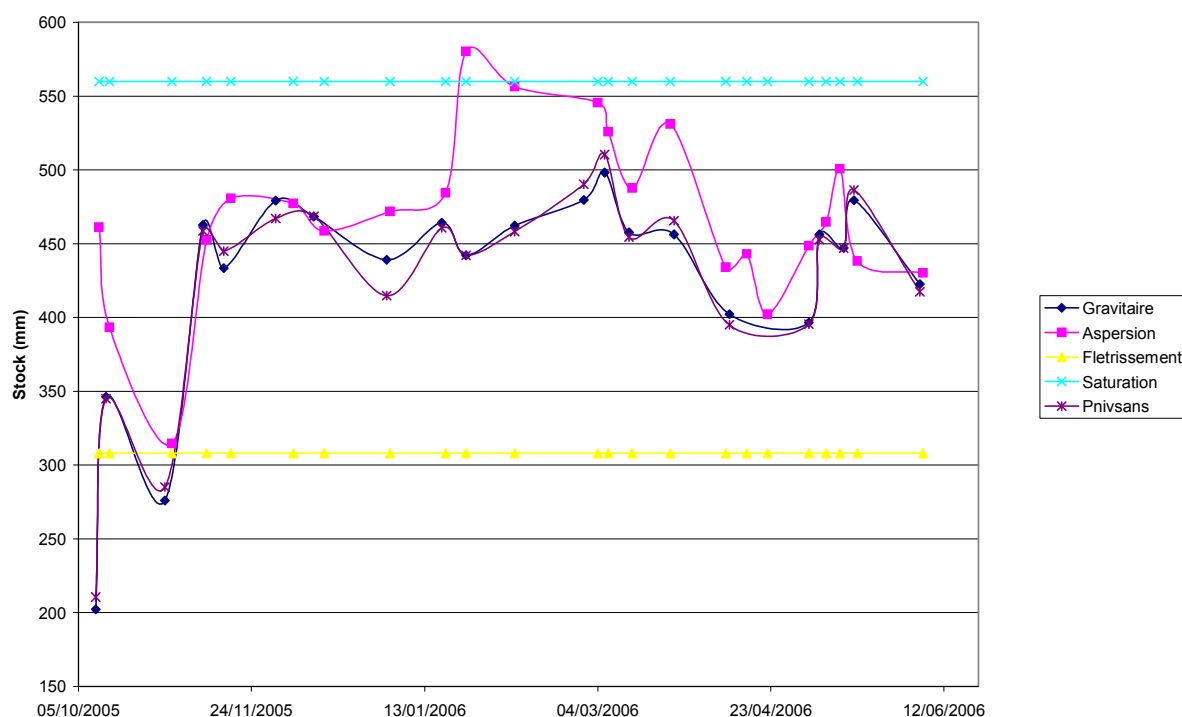
$$\sum_{i=1}^7 (\theta_i - \theta_{pfi}) * \Delta Z_i * 100 \quad \text{Equation 4}$$

$\theta_i$  : teneur en eau volumique de la couche considérée ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_{pfi}$  : teneur en eau volumique au point de flétrissement ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\Delta Z_i$  : épaisseur de la couche considérée (20 cm pour notre cas)

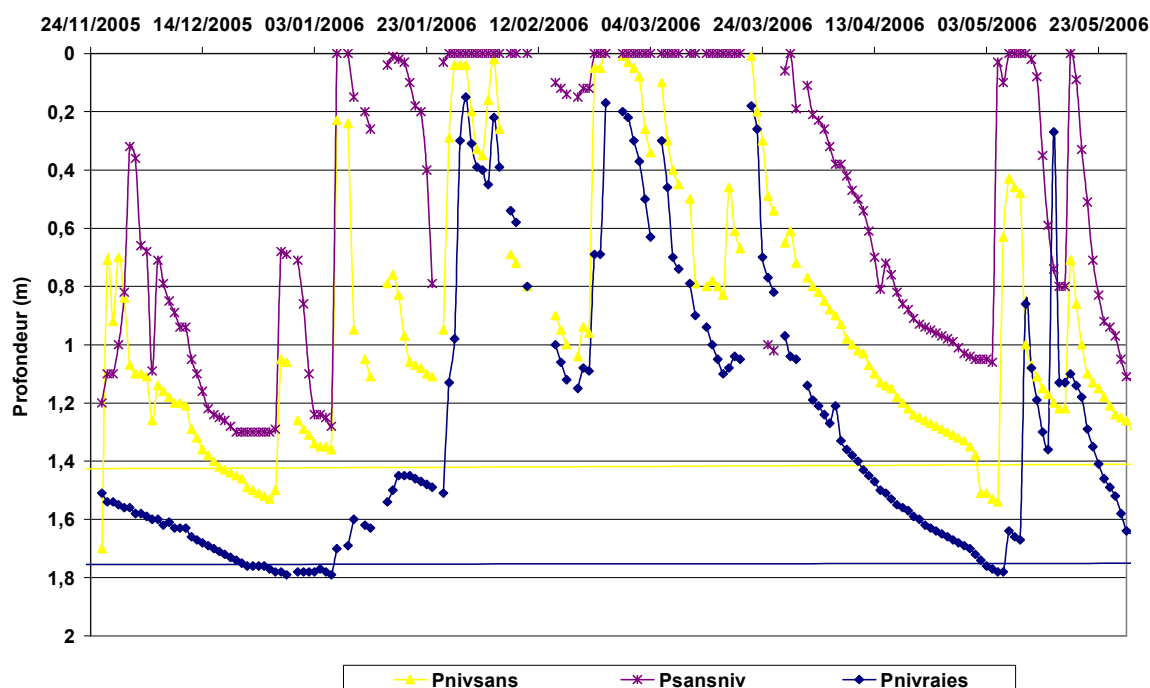
On constate que durant toute la campagne, le stock de la parcelle non nivelée (aspersion) est toujours plus important que celui de la parcelle nivelée dotée de raies et que celui de la parcelle nivelée (gravitaire). Ceci peut être expliqué par le déficit de ruissellement que connaît Psansniv. Les conditions de saturation durant la période s'étalant du début du mois de janvier jusqu'à la fin de février qui s'accompagnent d'un manque d'oxygène pour le sol restent néfastes pour la croissance et le développement de la majorité des espèces cultivées.



**Figure 17.** Evolution du stock sur la profondeur de 1.4 m durant la campagne 2005/06

En effet, une nappe peu profonde est présente dans la station. Cette nappe réagit rapidement. Chaque intensité dépassant 10 mm/j entraînerait sa remontée conjointement à celle de l'humidité du sol. La nappe connaît des fluctuations importantes et peut séjourner plusieurs jours au voisinage de la surface du sol créant des conditions d'hydromorphie. Ces conditions de saturation du sol contribuent à la genèse d'un milieu asphyxiant défavorable à la croissance de la plante. C'est le cas de la parcelle non nivelée où la nappe a séjourné à la surface du sol pendant plusieurs jours comme indiqué à la Figure 18. Hammani (2002) a relevé que cette nappe peut affleurer à la surface de la station mais sans indiquer dans quelles parcelles et leurs altitudes par rapports aux autres parcelles. Le rôle du nivellement est mis en évidence du fait que pour les deux parcelles nivelées avec ou sans raies le toit de la nappe est plus profond que

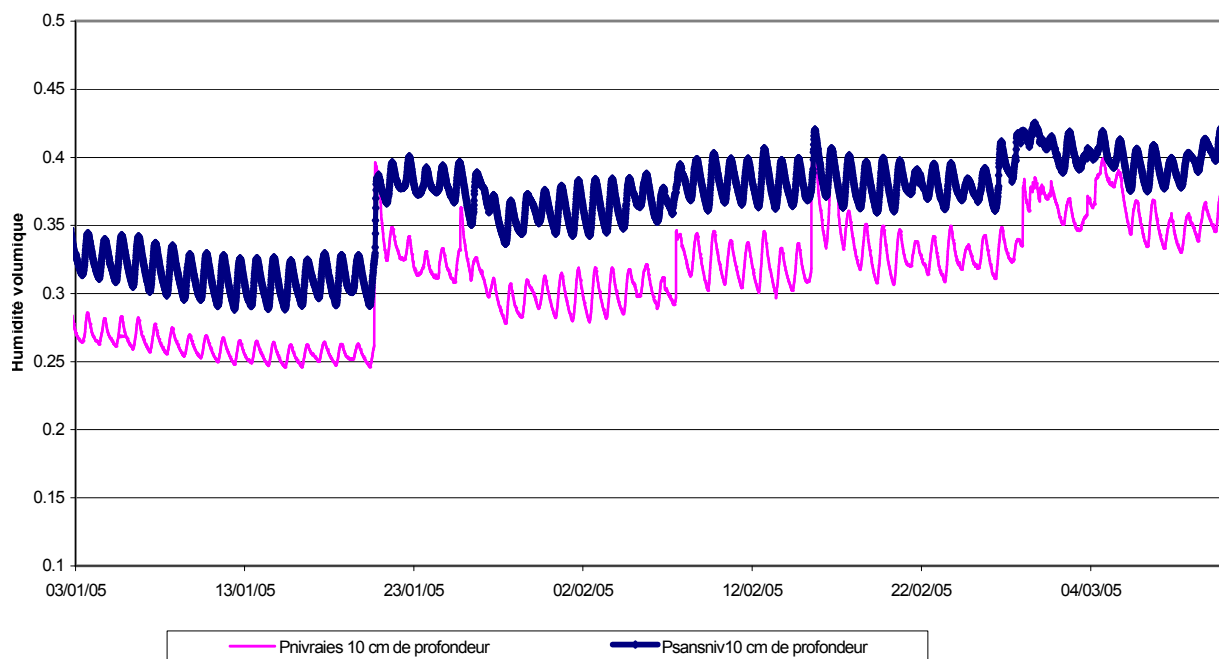
celui de la parcelle non nivelée. La comparaison des deux parcelles nivelées fait apparaître le rôle joué par les raies pour l'évacuation des eaux de surface.



**Figure 18.** Evolution du niveau de la nappe pour les 3 parcelles durant la saison 2005/06

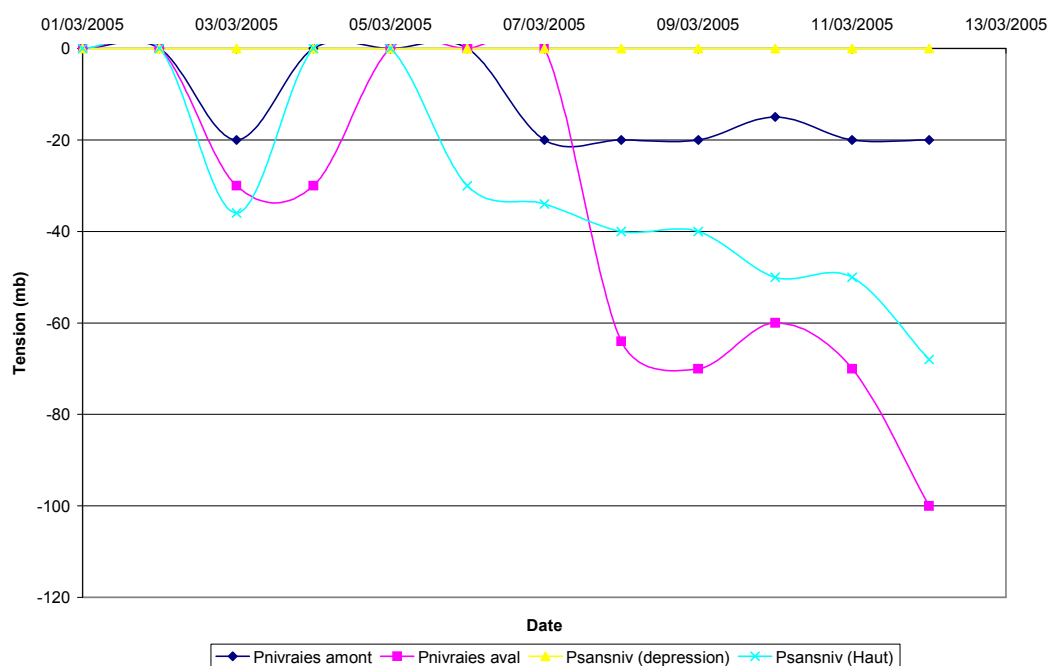
Selon Ringuelet (1971) une précipitation de 200 mm (plus en accord avec la RU de 180 mm/m) peut être absorbée par les sols du Gharb à condition qu'elle soit convenablement distribuée dans le temps. Cette hauteur de précipitation est assez proche de la réserve utile du sol. Des stagnations apparaissent toutefois pour des hauteurs de pluie beaucoup plus faibles. Au début de l'automne, la nappe et la teneur en eau du sol sont à leurs niveaux les plus bas. La présence de fentes de retrait induit une forte capacité d'infiltration lors des premières pluies lesquelles contribuent rapidement à l'humectation du profil du sol jusqu'au voisinage de la nappe et à la disparition de la fissuration.

A une échelle plus réduite, et en s'intéressant à la profondeur de 10 cm, siège des racines des jeunes plantules durant leurs premières phases sensibles, la mesure en continue de l'humidité par TDR a montré que la parcelle non nivelée présente toujours une humidité importante par rapport à la parcelle nivelée avec raies (Figure 19).



**Figure 19.** Evolution de l'humidité volumique mesurée par TDR à 10 cm de profondeur de janvier à mars 2005

En analysant les valeurs tensiométriques au voisinage de la surface du sol (0-10 cm) sur l'épisode de mars 2006, les tensions sont plus élevées en valeurs absolues sur la parcelle nivelée avec raies que sur la parcelle non nivelée (Figure 20). A la lumière de ce qui précède, on peut conclure que les raies par leurs dimensions jouent le rôle de miros fossés drainant. Et on pense aussi, que pour Psansniv, les points hauts de la parcelle drainent vers les points bas où dépressions.



**Figure 20.** Evolution de la tension au niveau des 20 premiers cm suite à l'épisode pluvieux de mars 2005

### II.10.3. Analyses des paramètres agronomiques

#### II.10.3.1. Evolution de l'indice foliaire ( LAI)

Le LAI a été déterminé par planimétrie des feuilles correspondant à 8 betteraves à l'amont, 8 au milieu et 8 à l'aval des parcelles nivelées, et 8 au niveau des points haut et 8 au point bas de la parcelle non nivelée. Donc, la valeur du LAI par date de prélèvement et par parcelle porte sur une moyenne des betteraves concernées. Ces betteraves ont été prélevées l'une à côté de l'autre au niveau de chaque traitement. La méthode reste laborieuse. Elle consiste à dessiner toutes les feuilles (pétiole et limbe) d'un échantillon sur du papier, et de mesurer ensuite les différentes surfaces ainsi obtenues (en cm<sup>2</sup>) à l'aide d'un planimètre.

Ainsi, pour chaque échantillon, on a l'indice foliaire (LAI) suivant :

$$\text{LAI} = (\sum S_i) / A_m$$

Avec :

-  $S_i$  : surface élémentaire (en cm<sup>2</sup>) (limbe et pétiole) de l'échantillon

-  $A_m$  : surface occupée (en cm<sup>2</sup>) par la masse foliaire =  $E_L \times e$

Où

-  $E_L$  : espacement entre lignes = 50 cm, et

- **e** : espacement entre plants sur la même ligne = 20 cm,

$$\text{alors } A_m = 50 \text{ cm} * 20 \text{ cm} = 1000 \text{ cm}^2$$

Par conséquent, on a : **LAI (cm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>) = ( $\sum S_i$ ) / 1000**

D'après le Tableau 5 , le Tableau 6 et le

Tableau 7 portant sur l'évolution du LAI de la betterave à sucre pour les différentes parcelles objets des expérimentations et pour les 3 dates de semis (le 29/01/04 la première année), (le 20/11/2004 la deuxième année) et le (27/10/2005 la troisième année) permettent de relever les observations suivantes :

- La valeur maximale du LAI varie d'une campagne à l'autre en fonction de la date de semis. Elle est de 4.75 (119 JAS), de 5 (179 JAS) et de 5.70 (159 JAS) pour la parcelle nivelée et disposant de raies respectivement pour les campagnes 2003/04, 2004/05 et 2005/06. Pour la parcelle la parcelle non nivelée sont de l'ordre de 2.98 (127 JAS), 3.10 (179 JAS) et 4.65 (209 JAS) respectivement pour les campagnes 2003/04, 2004/05 et 2005/06. Toutefois, ces valeurs restent supérieures à 4 valeur optimale du LAI pour achever le maximum de croissance de la betterave à sucre. (Rover 1994, Kenter and Hoffman 2002) cités par Hoffman *et al.*, (2004) .
- Les valeurs du LAI de la parcelle non nivelée sont toujours faibles par rapport à celles des parcelles nivelées. Ceci nous conduit à penser que les conditions d'excès d'eau sont à l'origine de cet écart de LAI. De ce fait, on s'est intéressé à ce qui se passe entre les points hauts et bas de la parcelle non nivelée. La Figure 21 illustre l'évolution du LAI des points hauts et bas de la parcelle non nivelée.
- Les coefficients de variation sont importants en début de cycle de la culture pour les différentes parcelles mais ils ont tendance à baisser en fin de campagne. Par contre, pour la parcelle non nivelée, les coefficients de variation sont les plus importants quelque soit la campagne et n'ont pas tendance à baisser en fin du cycle. Ceci s'explique par l'hétérogénéité entre les points hauts et bas de la parcelle. Ceci est clairement démontré au niveau de la Figure 21 représentant les LAI des points hauts et bas de la parcelle non nivelée.

**Tableau 5.** Le LAI de la betterave à sucre campagne 2003/04

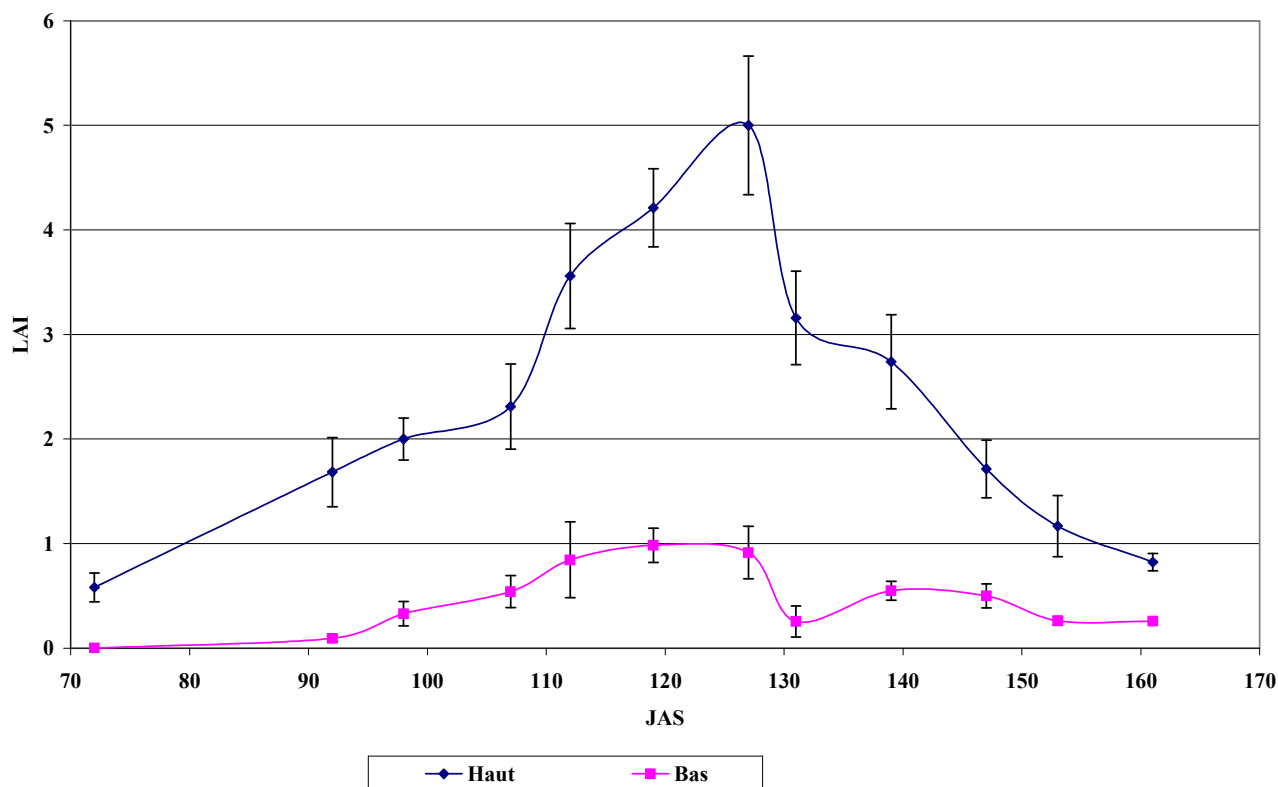
| JAS | Parcelle nivelée avec raies |            |      | Parcelle non nivelée |            |      |
|-----|-----------------------------|------------|------|----------------------|------------|------|
|     | LAI                         | Ecart type | Cv   | LAI                  | Ecart type | CV   |
| 72  | 0.39                        | 0.29       | 0.07 | 0.29                 | 0.18       | 0.24 |
| 92  | 1.21                        | 0.89       | 0.21 | 0.89                 | 0.17       | 0.23 |
| 98  | 1.60                        | 1.17       | 0.28 | 1.17                 | 0.18       | 0.25 |
| 107 | 2.85                        | 1.43       | 0.41 | 1.43                 | 0.15       | 0.22 |
| 112 | 3.04                        | 2.20       | 0.34 | 2.20                 | 0.11       | 0.16 |
| 119 | 4.75                        | 2.60       | 0.39 | 2.60                 | 0.08       | 0.10 |
| 127 | 3.85                        | 2.98       | 0.29 | 2.98                 | 0.08       | 0.23 |
| 131 | 3.24                        | 1.78       | 0.33 | 1.78                 | 0.10       | 0.19 |
| 139 | 2.80                        | 1.64       | 0.25 | 1.64                 | 0.09       | 0.19 |
| 147 | 1.83                        | 1.11       | 0.12 | 1.11                 | 0.07       | 0.20 |
| 153 | 1.68                        | 0.71       | 0.13 | 0.71                 | 0.08       | 0.27 |
| 161 | 0.87                        | 0.54       | 0.09 | 0.54                 | 0.10       | 0.12 |

**Tableau 6.** Le LAI de la betterave à sucre campagne 2004/05

| JAS | Nivelée sans       |            |       |      |             |       |      |            |       |
|-----|--------------------|------------|-------|------|-------------|-------|------|------------|-------|
|     | Nivelée avec raies |            |       |      | Non nivelée |       |      |            |       |
|     | LAI                | Ecart type | CV    | LAI  | Ecart type  | CV    | LAI  | Ecart type | CV    |
| 122 | 2.10               | 0.34       | 16.19 | 1.30 | 0.30        | 23.08 | 0.30 | 0.10       | 33.33 |
| 135 | 2.10               | 0.29       | 13.81 | 2.10 | 0.35        | 16.67 | 1.00 | 0.10       | 10.00 |
| 153 | 3.70               | 0.40       | 10.81 | 4.00 | 0.28        | 7.00  | 2.00 | 0.70       | 35.00 |
| 165 | 4.80               | 0.25       | 5.21  | 4.50 | 0.23        | 5.11  | 2.70 | 0.40       | 14.81 |
| 179 | 5.00               | 0.18       | 3.60  | 5.60 | 0.19        | 3.39  | 3.10 | 0.70       | 22.58 |
| 188 | 4.70               | 0.20       | 4.26  | 4.30 | 0.18        | 4.19  | 2.70 | 0.20       | 7.41  |
| 195 | 4.10               | 0.17       | 4.15  | 4.10 | 0.13        | 3.17  | 2.50 | 0.10       | 4.00  |

**Tableau 7.** Le LAI de la betterave à sucre campagne 2005/06

| JAS | Nivelée sans       |            |      |      |             |      |      |            |      |
|-----|--------------------|------------|------|------|-------------|------|------|------------|------|
|     | Nivelée avec raies |            |      |      | Non nivelée |      |      |            |      |
|     | LAI                | Ecart type | CV   | LAI  | Ecart type  | CV   | LAI  | Ecart type | CV   |
| 109 | 3.50               | 0.42       | 0.12 | 3.70 | 0.49        | 0.13 | 2.30 | 0.42       | 0.18 |
| 139 | 4.00               | 0.49       | 0.12 | 4.50 | 0.53        | 0.12 | 2.50 | 0.58       | 0.23 |
| 159 | 5.70               | 0.51       | 0.09 | 5.20 | 0.61        | 0.12 | 4.50 | 0.58       | 0.13 |
| 171 | 5.10               | 0.33       | 0.06 | 4.80 | 0.30        | 0.06 | 4.30 | 0.45       | 0.10 |
| 191 | 4.80               | 0.38       | 0.08 | 4.10 | 0.20        | 0.05 | 4.50 | 0.55       | 0.12 |
| 209 | 4.00               | 0.29       | 0.07 | 4.00 | 0.20        | 0.05 | 4.20 | 0.69       | 0.15 |

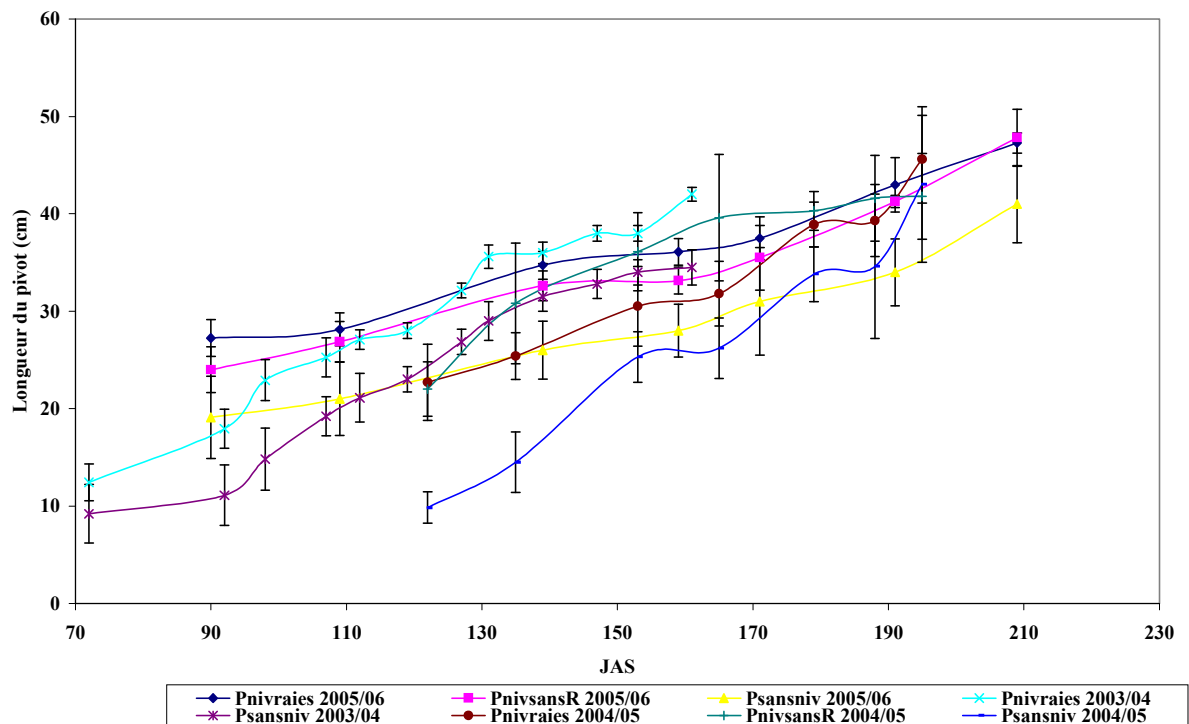


**Figure 21.** Evolution du LAI au cours de la saison 2003/2004 pour la parcelle non nivelée

### II.10.3.2. Evolution de la longueur du pivot

Le suivi de l'évolution de la longueur du pivot de la betterave à sucre pour les 3 campagnes expérimentales sur les 3 parcelles Pnivraies, PnivsansR et Psansniv déterminée sur la base d'une moyenne sur 24 betteraves au niveau des parcelles nivelées (8 amont, 8 au milieu et 8 aval) et de 16 betteraves (8 points hauts et 8 points bas) sur la parcelle non nivelée a permis de relever que le pivot n'a jamais dépassé une longueur de 50 cm ce qui reste inférieur à la longueur mesurée par Pressurot (1997) sur le même site expérimental. En effet, et pour la parcelle nivelée dotée de raies ayant présentée les longueurs les plus importantes, elles sont de l'ordre de 42 cm avec un écart type 1.03 cm, 45.5 cm et un écart type de 4.4 cm et de 47.27 cm et un écart type de 1.04 cm respectivement pour la campagne 2003/04, 2004/05 et 2005/06. Pour la parcelle non nivelée, ces longueurs sont de l'ordre de 34.50 cm avec un écart type de 2.4 cm, 43 cm avec un écart de 8 cm, 41 cm avec un écart type de 4.1 cm respectivement pour les campagnes de 2003/04, 2004/05 et 2005/06. La parcelle nivelée sans raies présentait quant à elle des longueurs proches de celles de la parcelle nivelée dotée de raies comme indiqué sur la Figure 22. Les CV restent généralement importants en début du cycle mais diminuent vers la fin du cycle dû au pouvoir de récupération de la betterave à sucre

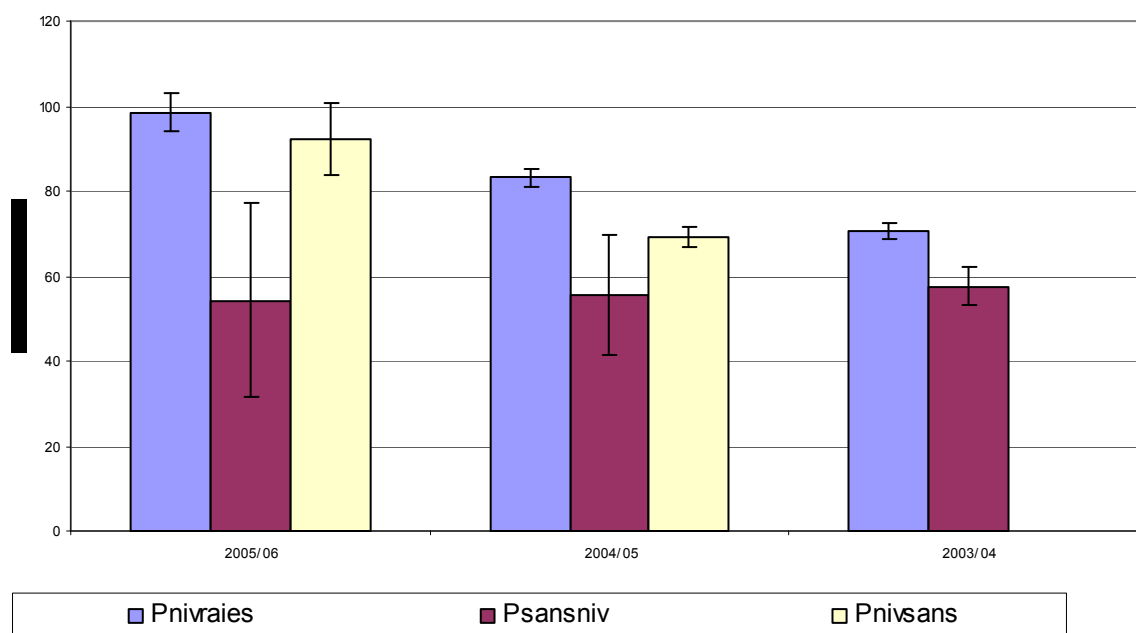
sauf pour la parcelle non nivelée où on enregistre des CV importants jusqu'à la fin du cycle dû à l'hétérogénéité des betteraves provenant des points haut et bas.



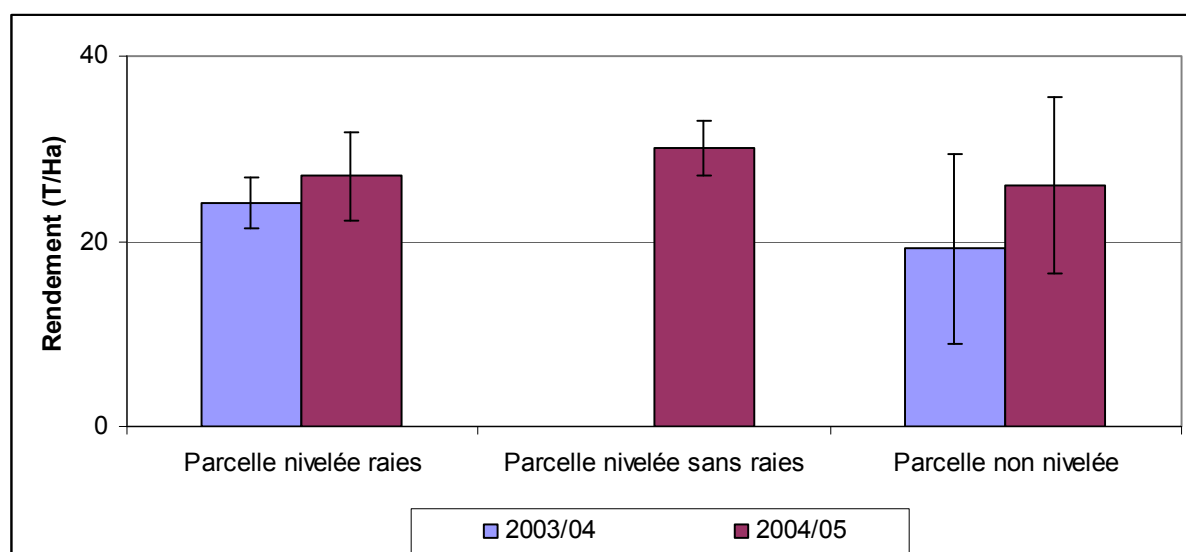
**Figure 22.** Evolution de la longueur du pivot pour les 3 parcelles et pour les 3 campagnes

### II.10.3. Analyse des rendements

Il est nécessaire de rappeler qu'il s'agit du rendement moyen relatif à la superficie récoltée au niveau de 15 placettes de deux mètres carrées chacune (5 amonts, 5 milieux et 5 aval) de chacune des deux parcelles nivelées aussi bien à la SEHA que chez les agriculteurs (5 points hauts et 5 points bas) de la parcelle non nivelée pour les traitements irrigués et 9 placettes dont 3 amont, 3 au milieu et 3 aval pour les parcelles nivelées et 6 placettes pour la parcelle non nivelée dont 3 sont situées dans les dépressions et 3 sur les points hauts. Toutes les placettes ont été choisies aléatoirement. Le rendement serait en fait beaucoup plus faible si on le rapportait à la superficie emblavée, concernant la parcelle non nivelée Psansniv.



**Figure 23.** Rendement racines (T/Ha) des différentes parcelles pour les campagnes 2003/04 à 2005/06 (traitements irrigués)



**Figure 24.** Rendement racines (T/Ha) des différentes parcelles pour les campagnes 2003/04 à 2004/05 (Traitements non irrigués)

Les Figure 23 et Figure 24 représentent le rendement moyen en racine de chaque parcelle aussi bien en irrigué qu'en pluvial. Après la comparaison des deux graphiques, il ressort que l'irrigation d'appoint joue un rôle fondamental pour l'amélioration des rendements de la

betterave à sucre dans le Gharb. En fait, les rendements passent du simple au double voire au triple en apportant les irrigations nécessaires qui ne sont souvent pas nombreuses. (1 irrigation en 2003/04, 5 irrigations en 2004/05 et 2 irrigations en 2005/06). Paradoxalement, la campagne 2004/05 était sèche mais les rendements en pluvial sont supérieurs à ceux obtenus en 2003/04, nous pensons que la date de semis tardive (28/01/2004) peut expliquer cet écart de rendement, plus le semis est tardif plus le recours à l'irrigation s'impose. Aussi, la présence de souches résultantes de la canne à sucre (précédent cultural) ont influencé certainement le rendement en pluvial pour la campagne 2003/04. Aussi, et même si la campagne 2004/05 était sèche, les précipitations reçues en février et mars 2005 peuvent influencer le rendement. Chati *et al.*, (1999) ont noté que la betterave à sucre est dotée d'une très grande capacité de récupération de son activité physiologique, si un déficit hydrique est appliqué au début du cycle. Soltner (1999) a relevé que la betterave à sucre résiste à des périodes de sécheresse en soulignant que la croissance de la racine ralentit avec celle-ci et reprend avec le retour de la pluie. Le rendement de la parcelle nivelée sans raies en 2004/05 de 30 T/ha et un écart type de 4.8 T/ha est légèrement supérieur à celui de la parcelle nivelée dotée de raies qui est de 25 T/ha et un écart type de 3 T/ha. Cette différence n'est pas perceptible au seuil de 1% mais elle l'est au seuil de 5% ce qui laisserait penser que les raies peuvent être une source de dessèchement du sol par effet de drainage en pluvial

Pour les traitements irrigués, on note que le rendement de la parcelle Pnivraies s'est accru de façon notable. En effet, il est passé de 70 T/ha à 98 T/ha. Cet écart de rendement peut être expliqué par le fait que lors de la campagne 2003/04, et à l'instar des traitements conduits en pluvial, la présence des souches de cannes à sucres non dégradées a dû certainement impacté le rendement. Notons qu'un semis tardif, engendre une récolte tardive. Il peut en résulter une réduction de la durée du cycle et une exposition de la culture à des températures plus élevées (en fin de cycle) préjudiciables au rendement. Concernant la campagne 2004/05, la plaine du Gharb a connu une période de gel s'étalant de fin décembre 2004 à la fin de la deuxième décade du mois de février 2005 ce qui eu aussi des conséquences sur les rendements. Papy (1973) relève que les basses températures affectent la morphologie des feuilles et entraînent également une diminution de la surface foliaire et du poids final sous climat méditerranéen. Quant aux rendements de la parcelle Psansniv, ceux-ci n'ont pas connu de fluctuation compte tenu du fait que l'aspersion permet de lutter contre le gel d'autant que l'hétérogénéité spatiale de la parcelle pourrait cacher l'influence d'autres facteurs. Nous pensons que ce rendement de 55 T/ha demeure une valeur potentielle pour ce type de parcelle sans nivellement. En effet,

les impacts restent similaires pour les points bas que l'apport d'eau résulte des précipitations ou des irrigations. Belabbes (1999) notait que la gestion de l'irrigation n'était pas de nature à faciliter le travail d'assainissement entrepris depuis les années 1970 dans la plaine du Gharb. En effet, les apports d'irrigations ne peuvent être adaptés par placette surtout que nous utilisons un écartement régulier d'asperseurs (18\*18m) et le même type d'asperseurs (5.6 mm/h). Des dépressions et des points hauts sont irrigués de la même manière. L'irrigation dite de précision n'est évidemment pas bien envisageable, il est en effet difficile d'apporter dans ce contexte des doses différentes sur une topographie aussi chaotique. Les écarts types affichent une grande variation d'une parcelle à une autre. En fait, l'écart type passe de 3.32 T/Ha à 5.44 T/Ha respectivement pour la campagne 2003/04 et 2004/05 pour la parcelle nivelée avec raies (Pnivraies) et de 20.07 T/Ha à 37.40 T/ha respectivement pour la campagne 2004/05 et 2005/06 pour la parcelle non nivelée (Psansniv). Les coefficients de variation pour cette même parcelle varient entre 36 et 68%. Ce qui témoigne de la grande hétérogénéité qui existe entre les parties récoltables de la parcelle non nivelée (points hauts et dépressions de la parcelle). En effet, pour la parcelle nivelée et irriguée en aspersion, l'écart type varie de 6.04 T/ha à 6.43 T/ha respectivement pour les campagnes 2005/06 et 2004/05. En effet, l'analyse statistique des rendements (Annexe II), en utilisant un test bilatéral de Student au risque de 5% montre que les hypothèses d'égalité des moyennes des parcelles Pnivraies (nivelée avec raies) et Psansniv (sans nivellement) de même qu'entre PnivsansR (nivelée sans raies) et Psansniv sont rejetées. Cela nous permet d'affirmer que les différences de rendement sont très significatives entre la parcelle nivelée dotée de raies longues irriguée gravitairement et la parcelle non nivelée irriguée par aspersion d'une part et entre la parcelle nivelée et la parcelle non nivelée irriguées par aspersion d'autres part. Ceci milite en faveur de la réalisation du nivellement pour l'amélioration des rendements de la betterave à sucre dans le Gharb. Concernant la campagne 2005/06, des différences significatives (au seuil de 5%) entre ces deux parcelles sont constatées. Si le rôle du nivellement a été fondamental pour l'amélioration des rendements (comparaison parcelle nivelée et non nivelée), la présence des raies expliquerait-elle la différence des rendements entre la parcelle nivelée avec ou sans le raies (2005-2006). Cette différence est à peine significative au seuil de 5% (elle ne l'est pas au seuil de 1%). Cette légère différence en faveur du système avec raies pourrait être imputable au rôle drainant de celles-ci lors des épisodes pluvieux de 2005-2006, mettant à l'abri des excès d'eau la culture installée sur les billons. La question permettant de savoir si le nivellement à lui seul est suffisant, pour atteindre le potentiel régional en matière de rendement sous condition que tous les autres facteurs de production soient maîtrisés, demeure posée. Un fait

cependant indéniable est que l'analyse des rendements a mis en évidence le rôle fondamental joué par le système de la raie longue modernisé pour l'évacuation des excédents d'eau en hiver et l'amélioration de la production dans le contexte du Ghab. Concernant, les essais chez les agriculteurs, les rendements sont de l'ordre de 103 T/ha et un écart type de 4.4 T/ha pour l'agriculteur en gravitaire et 95 T/ha avec un écart type de 6.6 T/ha. Les coefficients de variation sont faibles pour les deux cas : 4.25 % pour le premier cas et de 7% pour le second. Il apparaît qu'à la faveur du nivellement les rendements sont améliorés substantiellement. La moyenne au niveau du périmètre n'a pas dépassé. 50 T/ha. Ces résultats confirment aussi ceux obtenus par Jenane *et al.*, (1997) concernant le semis sur billons et sur planches (109 cm de largeur avec deux lignes de betteraves à sucremonogermes espacées de 35 cm) et ayant conclu que ces pratiques ont permis de procéder à des irrigations gravitaires satisfaisantes et ayant permis de limiter les stagnations d'eau au niveau de la parcelle.

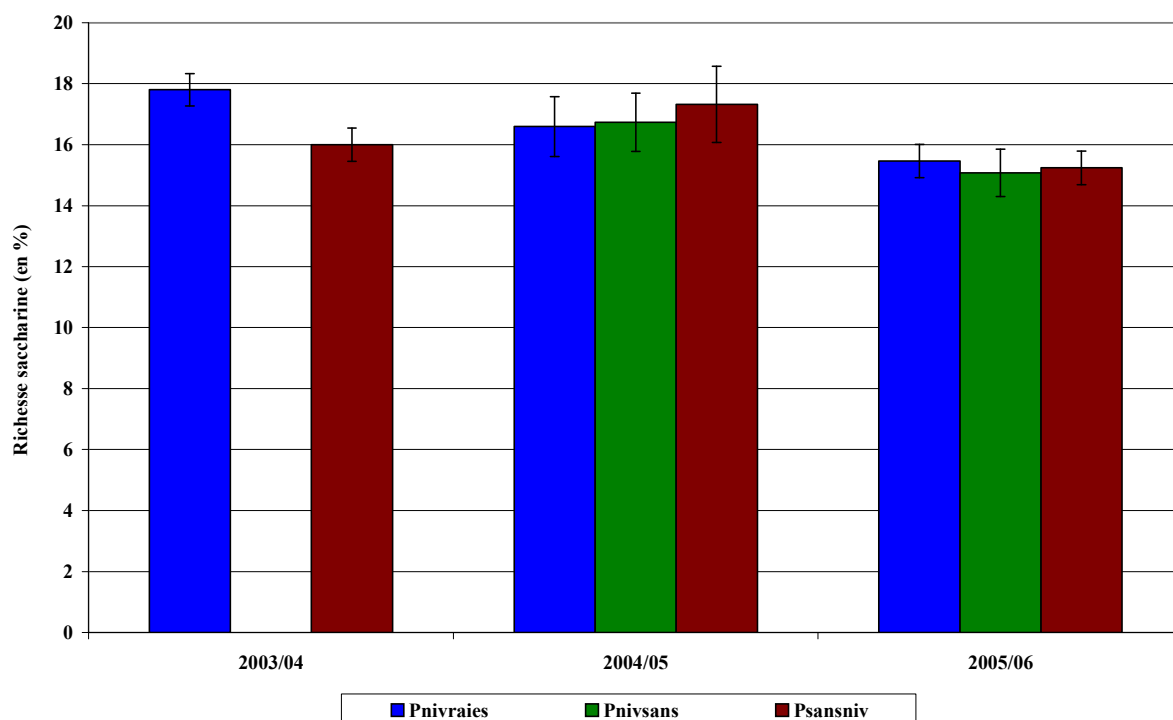
Par ailleurs, et considérant chaque cas de parcelle séparément, nous avons montré que le rendement a tendance à augmenter de l'amont vers l'aval pour la parcelle nivelée dotée de raies aussi bien à la station expérimentale que chez l'agriculteur. En effet, celui-ci passe de 68.7 T/ha à 70.38 T/ha pour 2003/04, de 78.9 à 89.3 T/ha, pour la campagne 2004/05 et de 94.8 à 103.7 T/ha pour la campagne 2005/06 au niveau de la SEHA et de 98 T/ha à 107 T/ha) chez l'agriculteur en gravitaire. Cette augmentation peut s'expliquer par la présence de la colature aval qui jouerait un rôle important pour le drainage de surface. Une autre explication pourrait être que l'aval peut constituer une zone d'accumulation des engrais et des éléments fertilisants. Mais cette dernière hypothèse bien évidemment nécessite vérification au moyen des techniques de prélèvements d'échantillons de sol adaptées à la problématique de l'azote. Par contre, pour la parcelle nivelée dotée de raies, le milieu de la parcelle a présenté chaque année les rendements les plus faibles au niveau de la SEHA. La différence par rapport à la moyenne observée est de 7.9 T/ha en 2004/05 et 10.6 T/ha en 2005/06. Nous pensons que ceci est dû à la difficulté d'écoulement de l'eau à la surface du sol sur des longueurs importantes en absence de raies (240 m de longueur et 18 m de longueur). Irrigué en gravitaire, un tel dispositif aurait été assimilé à un calant ou une planche d'irrigation. En effet, au Maghreb les planches ont le plus souvent des largeurs réduites ne dépassant pas une dizaine de mètres. L'écart de rendement peut donc s'expliquer par le temps relativement long que pourra mettre l'excès d'eau à s'éliminer au niveau de cette parcelle. La partie aval étant dotée d'une colature permettra d'évacuer rapidement l'eau, contrairement à la partie intermédiaire. On s'autorise à penser que là où les rendements sont les plus faibles, il fallait installer une colature de recueillement des eaux. Cette tendance n'a pas été relevée chez l'agriculteur en aspersion

nivelée. En effet, sa parcelle nivelée dans le sens de la largeur (80 m) est dominée par une colature sur toute sa longueur (140m). Les rendements ont augmenté de l'amont vers l'aval. Les rendements sont passés de 87.4 T/ha à 101 T/ha avec des Ecart Types de 2.3 T/ha et 4.2 T/ha. Il est vrai que les différences entre l'amont et l'aval ne sont pas importantes, mais ceci laisserait penser que pour l'aspersif, le mieux serait de le niveler dans le sens de la largeur pour améliorer les conditions de croissance et de développement des cultures.

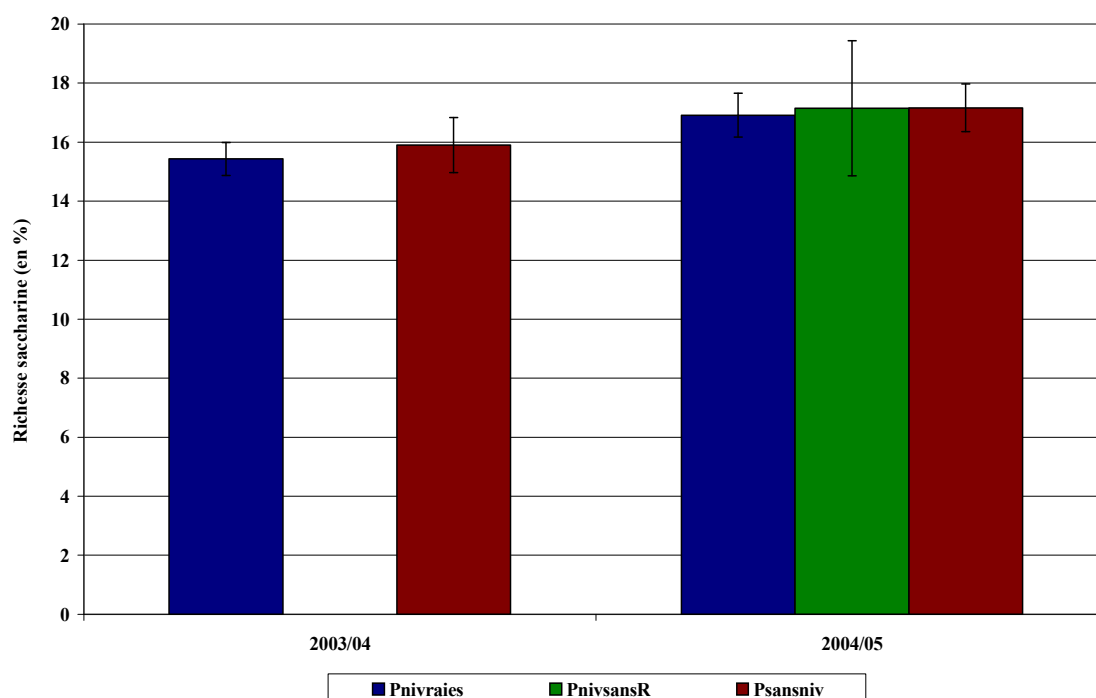
Concernant la parcelle non nivelée, les rendements varient du simple au double durant les campagnes 2003/04 et 2004/05. En effet, les rendements passent respectivement de 36.7 T/ha à 76.6 T/ha et de 37.9 à 73.3 T/ha. Les écarts types des points bas sont trop importants et varient de 10,4 à 13.6T/ha ce qui témoigne de l'important écart obtenus en matière de rendements. Concernant, la campagne 2005/06, les points bas ont enregistré le rendement le faible dû à la mortalité qu'a subi la betterave à sucre durant les phases sensibles de son cycle. Le rendement est de 19.4 T/ha demeure le plus faible. Les points hauts quant à eux affichent des rendements proches de ceux obtenus sur les parcelles nivelées. Le test de Student (Annexe II) fait apparaître des différences entre l'amont, le milieu et l'aval des parcelles nivelées et les points haut et bas de la parcelle non nivelée. Les différences de rendements sont dûs aussi bien au peuplement entre points hauts et points bas (peuplement plus réduit dû aux asphyxies des graines et plantules) et aux poids des pivots plus faibles au niveau des points bas par rapport aux points hauts.

Concernant la richesse saccharine encore appelée taux de sucre, ce dernier est représenté sur les Figure 25 et Figure 26 respectivement pour la conduite en irrigué et en pluvial. On constate qu'elle dépend de l'hydraulicité de la campagne. En effet, la campagne 2005-2006 qui est la plus pluvieuse, a connu le taux le plus faible aussi bien pour le régime irrigué que pluvial. Toutefois, l'analyse statistique des richesses en sucre, en utilisant le test bilatéral de Student au risque de 5%, atteste que l'hypothèse d'égalité des moyennes entre Pnivraies, la parcelle nivelée sans raies et Psansniv est acceptée et on conclut ainsi qu'il n'y a pas de différence significative de teneur en sucre entre les deux parcelles.

Pour les essais chez les agriculteurs, les richesses en sucre sont de l'ordre de 15.8 % avec un écart type de 1.3 et un Cv de 8.3 % pour la parcelle gravitaire et de 13.5 %, un écart type de 0.7 % et un CV de 5.7 % pour la parcelle aspersion nivelée. Toutefois, il est à relever que ces richesses restent faibles ce qui peut être expliqué par les variétés utilisées du type E caractérisées par une richesse faible.

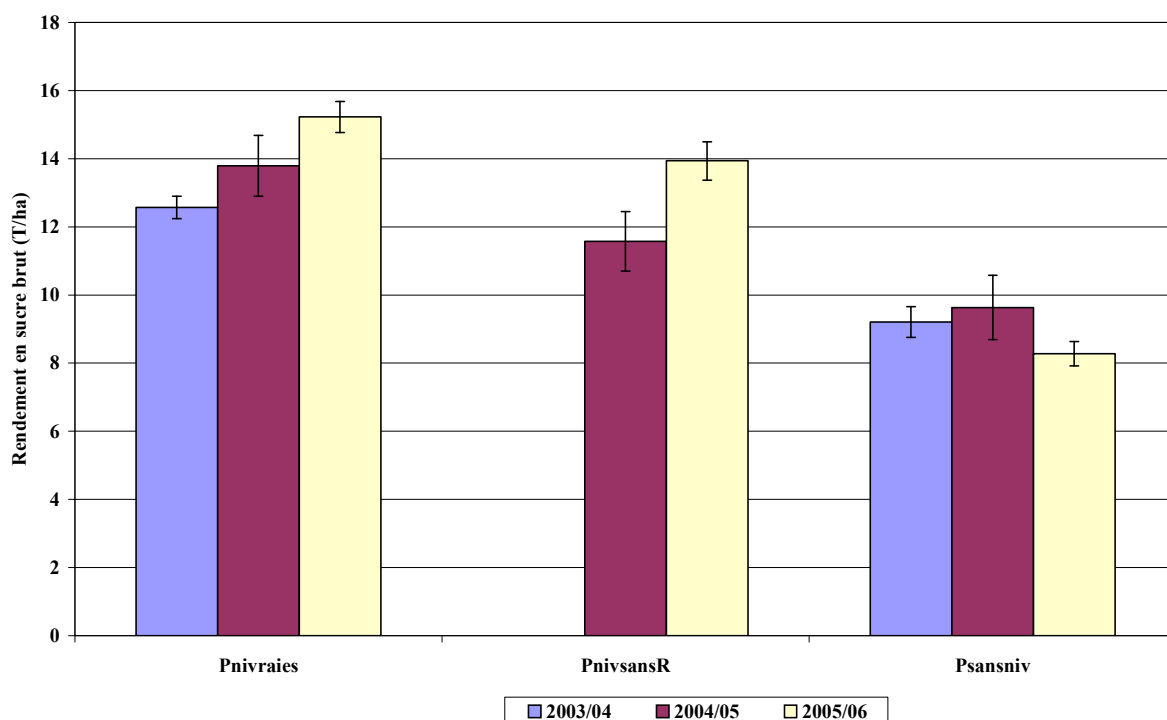


**Figure 25.** Richesse saccharine des différentes parcelles sous irrigation



**Figure 26.** Richesse saccharine des différentes parcelles non irriguées

Les rendements en sucre brut (T/ha) comme illustrée par la Figure 27 obtenus en multipliant la teneur en sucre par le rendement, montrent que, pour chaque campagne agricole, les meilleurs rendements sont obtenus au niveau de la parcelle nivelée dotée de raies. En effet, ils varient entre 12.6 T/ha avec un écart type de 0.33 T/ha en 2003/04 à 15.2 T/ha avec un écart type de 0.45 T/ha en 2005/06. Les rendements les plus faibles sont ceux de la parcelle non nivelée. Ils varient entre 8.3 T/ha, avec un écart type de 0.35T/ha pour la campagne 2005/06, et 9.63 T/ha avec un écart type de 0.94 T/ha pour la campagne 2004/05. Ceux de la parcelle nivelée sans raies sont plus proches de ceux de la parcelle nivelée dotée de raies et varient de 11.6 T/ha avec un écart type de l'ordre de 0.87 T/ha en 2004/05 et 13.9 T/ha avec un écart type de 0.56 T/ha en 2005/06. Toutefois, le test de Student a fait apparaître des différences significatives entre la parcelle nivelée dotée de raies et celle nivelée sans raies et entre cette dernière et celle non nivelée. Les rendements en sucre brut obtenu chez les agriculteurs sont l'ordre de 12.81 T/ha et 16.25 T/ha avec des écarts type respectif de 0.74 T/ha et 1.35 T/ha. Ceci confirme davantage le rôle du recours au nivellement pour l'amélioration des rendements dans la plaine du Gharb.



**Figure 27.** Rendements en sucre brut des différentes parcelles sous la conduite à l'ETM

#### II.10.4. Efficience agronomique de l'irrigation

Il s'agit ici de déterminer les efficacités agronomiques des irrigations (water use efficiency : WUE in Kg /ha/m<sup>3</sup>) de l'ensemble des parcelles selon les modes d'irrigation adoptés. Ces efficacités sont déterminées par la formule proposée par Bos (1980, 1985) cité par Howell (2001) et qui est comme suit : ((Rendement en irrigué - Rendement en sec)/ Quantité d'eau apportée par l'irrigation). Cette approche est différente de celle usuellement utilisée en agronomie: (Rendement économique/Quantité d'eau utilisée) (Viets, 1962) cité par Howell (2001). En effet, du fait que la plaine du Gharb est l'une des plaines les plus pluvieuses du pays, ceci a milité pour le choix de la première approche dans la mesure où le rendement en pluvial peut être relativement important en fonction des précipitations enregistrées.

Le nombre des irrigations a varié d'une campagne à une autre en fonction des précipitations. En fait, la betterave a reçu une irrigation durant la saison 2003/04 contre 5 irrigations durant la saison 2004/05. On constate d'après le Tableau 8 que les efficacités les plus importantes sont enregistrées pour les parcelles nivelées pour la campagne 2004-2005 ce qui témoigne du rôle joué par le nivellement et les raies pour l'évacuation des excédents d'eau. La parcelle non nivelée présente les efficacités les plus faibles quelque soit l'hydraulicité de l'année. Les résultats obtenus confirment une tendance classique à savoir : plus la betterave reçoit de l'eau

d'irrigation plus les efficacités agronomiques ont tendance à diminuer. L'absence de pente homogène est donc préjudiciable aux effets escomptés de l'irrigation aussi bien en condition de pluie que sous irrigation.

**Tableau 8.** Efficacités de l'irrigation selon différents façonnages de la parcelle

| Parcelle           | Apports<br>(m <sup>3</sup> /Ha) | Irrigations |       | Efficacité betterave<br>(Tracines/m <sup>3</sup> ) |       | Efficacité sucre<br>(Tsucre/m <sup>3</sup> ) |       |
|--------------------|---------------------------------|-------------|-------|----------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------|-------|
|                    |                                 | 03/04       | 04/05 | 03/04                                              | 04/05 | 03/04                                        | 04/05 |
| Nivelée avec raies | 1040                            |             | 4615  | 49.47                                              | 12.16 | 8.40                                         | 1.99  |
| Nivelée sans raies | -                               |             | 3684  |                                                    | 10.92 |                                              | 1.98  |
| Non nivelée        | 1000                            |             | 3584  | 33.46                                              | 8.03  | 6.24                                         | 1.25  |

**Tableau 9.** Efficacités de l'irrigation et précipitations selon différents façonnages de la parcelle

| Parcelle           | Apports Irrigations et<br>Précipitations<br>(m <sup>3</sup> /Ha) |       |       | Efficacité betterave<br>(Tracines/m <sup>3</sup> ) |       |       | Efficacité sucre<br>(Tsucre/m <sup>3</sup> ) |       |       |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------|-------|-------|
|                    | 05/06                                                            | 04/05 | 03/04 | 05/06                                              | 04/05 | 03/04 | 05/06                                        | 04/05 | 03/04 |
| Nivelée avec raies | 5088                                                             | 6761  | 5554  | 19.34                                              | 12.29 | 12.71 | 6.40                                         | 2.99  | 12.09 |
| Nivelée sans raies | 4750                                                             | 5830  | -     | 19.42                                              | 12.06 |       | 6.07                                         | 3.14  |       |
| Non nivelée        | 4758                                                             | 5730  | 5514  | 11.43                                              | 9.53  | 10.43 | 4.60                                         | 2.69  | 9.20  |

En s'intéressant à la consommation totale en eau (irrigations et précipitations) Tableau 9, nous constatons que les efficacités diminuent de façon substantielle par rapport à celles du Tableau 8 surtout pour (2003/04). Les apports (précipitations et Irrigations) varient entre 4700 m<sup>3</sup>/ha et 6700 m<sup>3</sup>/ha reflétant les besoins réels de la betterave à sucre dans le contexte du Gharb. Le volume global de la pluie à l'échelle de la campagne cacherait sa répartition saisonnière et son impact, mais nous nous trouvons dans un contexte aménagé en grande hydraulique disposant de beaucoup de ressources en eau de surface.

On constate aussi que pour la campagne 2005/06, très sèche en automne, l'irrigation du semis a été fondamentale. Cette campagne ayant reçu la plus faible quantité d'eau des 3 campagnes, présente les efficacités les plus fortes. Généralement, les agriculteurs au lieu de procéder aux irrigations lors des semailles scrutent le ciel en attendant les précipitations. En fait, les agriculteurs craignent que leurs irrigations automnales coïncident avec des précipitations ce qui rendraient leurs parcelles impraticables et engorgerait davantage les sols.

La même tendance se retrouve, les parcelles nivelées présentent les meilleures efficacités. Ce qui nous amène à conclure que l'absence de pente homogène est donc préjudiciable aux effets escomptés de l'irrigation aussi bien en condition de pluie que sous irrigation.

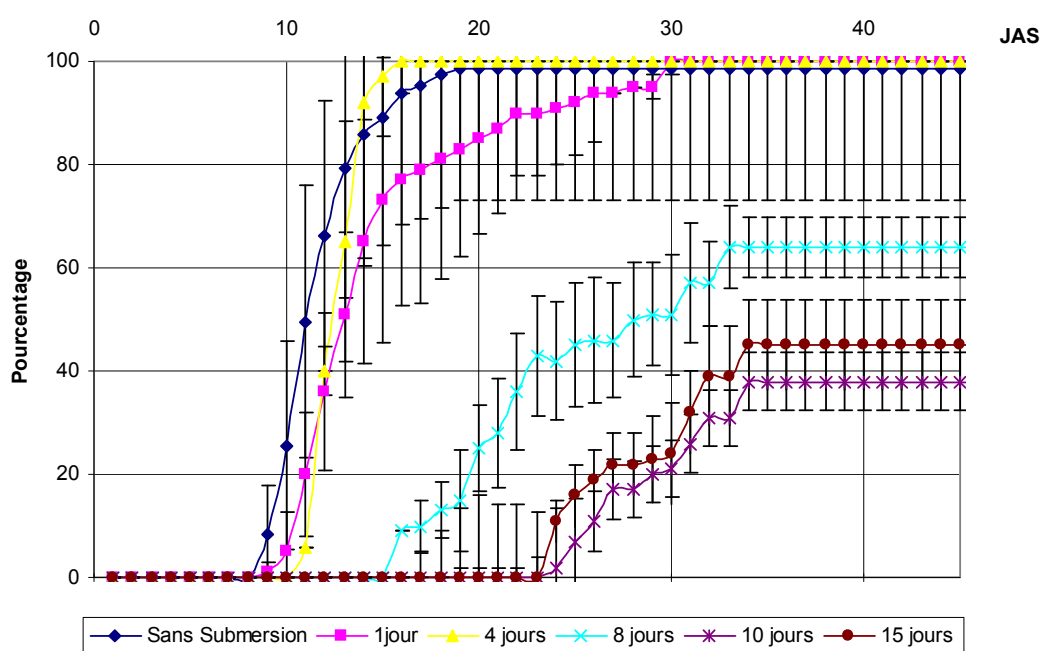
#### **II.10.5. Etude expérimentale des effets des stagnations d'eau sur la croissance de la betterave à sucre**

On rappelle qu'il n'existe pas de critère unique de caractérisation des excès d'eau parce que ces derniers dépendent du contexte pédoclimatique. Un de ces critères peut être la profondeur d'apparition de taches d'oxydoréduction, le niveau piézométrique hivernal ou encore la durée minimale de saturation en eau du sol. Dans tous les cas, la caractérisation de la contrainte devra être nécessairement objective. Les variables utilisées doivent être quantifiables et directement liées à la contrainte. Hammani (2002) avait relevé des stagnations au niveau du site expérimental de Souk Tlet. Il a établi deux cartes de localisation des stagnations pour une pluie de 70 mm/jour et une après une pluie de 20 mm/j. Il a constaté que les stagnations ont lieu au niveau des dépressions des parcelles non nivelées et à l'aval des parcelles gravitaires. Concernant, les parcelles gravitaires la contrainte principale était le sous dimensionnement de l'avaloir recueillant les eaux de ruissellement. Cette contrainte a été levée dans le cadre de notre expérimentation par la mise en place d'un dispositif approprié pour l'évacuation des eaux. L'impact des stagnations peut être constaté aussi bien en années pluvieuses qu'en années sèches parce que l'intensité et la période d'occurrence restent déterminantes dans la création des stagnations.

Les stagnations enregistrées au niveau des dépressions de la parcelle non nivelée sont des facteurs qui ont influencé la croissance de la betterave à sucre et impacté son rendement. Ces conditions interviennent souvent juste après les semailles ou aux premières phases de développement de la culture. Ceci nous a amené à réaliser des expérimentations de submersion des graines et des plantules de betterave à sucre sur les pots :

### II.9.4.1) Submersion des graines

La Figure 28 relate le pourcentage des graines ayant germé qui ont été soumises aux tests suivant : sans submersion, submersion d'un, quatre, huit, dix et quinze jours. L'analyse statistique de comparaison des moyennes selon le test de Newman Keuls (annexe II) fait ressortir trois groupes distinct dont les différences sont significatives entre elles, à savoir : le premier groupe sans submersion, submersion 1 jour et 4 jours, le deuxième groupe avec submersion 8 jours et un troisième groupe de submersion 10 et 15 jours. Cette analyse et la Figure 28 montrent clairement que des durées de submersion dépassant les 4 jours peuvent impacter négativement les levées de la betterave à sucre. Une chute d'environ 40% du peuplement peut être envisagée, d'autant plus que le retard dans la germination des graines peut avoir des conséquences négatives sur la suite de la croissance et le développement du végétal.

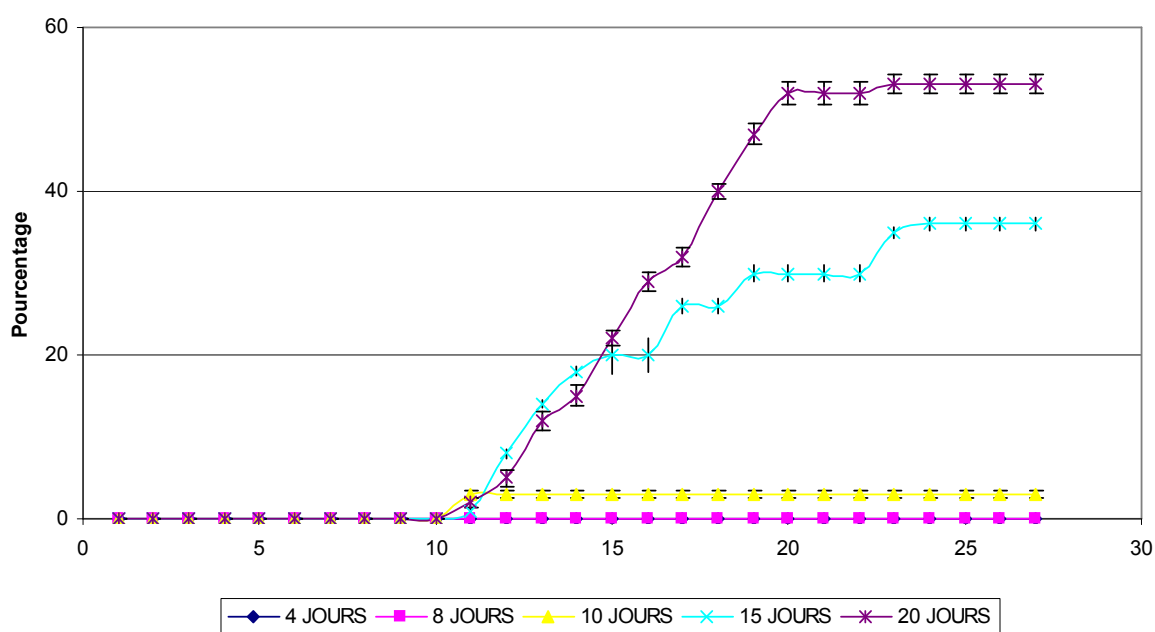


**Figure 28.** Evolution de la germination des graines de betterave à sucre suite à des submersions

Cannel et Belford (1982) avaient montré en cuves lysimétriques, avec une nappe maintenue à 5 cm de la surface du sol, que les conditions déficientes en oxygène sont préjudiciables durant les phases semis et levée et que lorsque les conditions deviennent favorables des retards à la levée de plusieurs jours sont observées. Ceci aura des répercussions sur la croissance et le développement de la betterave par la suite.

### II.9.4.2) Submersion des plantules

La Figure 29 relate le pourcentage des plantules au stade de 6 feuilles vraies et qui n'avaient subi aucune condition de stress d'excès d'eau auparavant. Les plantules ont été soumises aux tests suivant : submersion de quatre, huit, dix et quinze jours et 20 jours. L'analyse statistique de comparaison des moyennes selon le test de Newman Keuls (annexe II) fait ressortir trois groupes distincts dont les différences sont significatives entre elles à savoir : le premier groupe submersion 4 jours et 8 jours et 10 jours, le deuxième groupe avec submersion 15 jours et un troisième groupe de submersion 20 jours. Cette analyse illustrée par la Figure 29 montre clairement que des durées de submersion dépassant les 10 jours commencent à affecter la croissance de la betterave à sucre.



**Figure 29.** Evolution du pourcentage de plantules asphyxiées suite à la submersion

## II. 11. Conclusions

L'objectif de ce chapitre était d'analyser expérimentalement les performances hydrauliques et hydrologiques du drainage de surface par le recours au nivellement et à la mise en place des raies. Une évaluation des performances agronomiques a également été réalisée. Pour ce faire 3 parcelles présentant trois types de façonnage de surface distincts ont fait l'objet d'expérimentation : il s'agit d'une parcelle nivelée avec des raies Pnivraies, une deuxième parcelle nivelée sans raies PnivsansR et une troisième non nivelée et sans raies Psansniv. Ces

3 parcelles sont équipées de drains enterrés et disposent du système d'irrigation suivant : le système gravitaire pour la parcelle Pnivraies et le système aspersion pour les deux parcelles PnivsansR et Psansniv. La culture de betterave a servi de support à l'expérimentation. Il ressort de cette partie expérimentale que quelles que soient les conditions climatiques de la campagne, la betterave à sucre se trouve toujours sujette à certaines périodes de la campagne agricole à des excédents d'eau notamment au début des cycles où les processus élémentaires de croissance et de développement de la plante sont importants. Le recours au nivellement et la mise en place des raies longues jouent un rôle prépondérant dans l'évacuation des excès d'eau de surface en hiver. Les deux parcelles nivelées avec ou sans raies n'ont été sujettes à aucun excès d'eau. En fait, on peut même affirmer que les contraintes d'excès d'eau que connaît une parcelle non nivelée peuvent être rencontrées en période d'irrigation lorsque la parcelle est irriguée par aspersion.

D'un point de vue hydrologique, les restitutions du ruissellement déterminées sur la base des volumes cumulés recueillies à l'exutoire de la parcelle Pnivraies par rapport à l'excédent pluviométrique ( $P-ET_0$ ) durant la période s'étalant du semis jusqu'à la fin de la période pluvieuse, (mars 2005 et avril 2006) sont d'environ 20 % (13 mm) et 22% (16 mm) respectivement pour la première et la deuxième campagne. Les coefficients de ruissellement calculés à la base des volumes recueillis au niveau de l'exutoire de la parcelle nivelée dotée de raies par rapport au volume recueillis par les précipitations varient entre 19 et 65% durant les événements intenses.

Sur le plan hydraulique, le débit de pointe a atteint pour la raie longue environ 8 l/s/ha pour les années 2005 et 2006 alors qu'il est quasi inexistant pour les mêmes années pour la parcelle non nivelée et sans raies Psansniv. L'absence de ruissellement constatée au Psansniv entraîne des conditions de stagnations de durées variables selon les hydraulicités des campagnes. Ces dernières peuvent varier de quelques jours à quelques mois. Cette situation est préjudiciable aux semences ainsi qu'à la croissance lors des premiers stades culturels comme nous avons pu le mettre en évidence par les essais de submersion sur pots à la fois pour les graines et les plantules.

Le nivellement de surface et le système de la raie longue en favorisant l'évacuation des excès d'eaux hivernaux, contribue à l'accroissement des rendements de la betterave à sucre et à une meilleure valorisation de l'eau apportée par l'irrigation. Dans le contexte du Gharb, la mise en valeur agricole doit donc être raisonnée en intégrant la contrainte hivernale à l'origine des

excès d'eau préjudiciables aux cultures. Le rôle de l'irrigation d'appoint de la betterave à sucre a été également démontré d'autant que plus que la plaine du Gharb dispose des ressources importantes en eau de surface et eaux souterraines (en zone côtière). Pour bénéficier pleinement de l'apport de l'irrigation, les cultures doivent disposer de leurs potentialités à la sortie de l'hiver. Le nivellement et la mise en place des raies longues jouent un rôle fondamental dans l'atteinte de ces potentialités de production. On pourrait envisager de renforcer cette conclusion grâce à des expérimentations conduites sur plusieurs campagnes climatiquement contrastées ou, ce qui apparaît moins coûteux, par le recours à la modélisation. C'est cette dernière approche que nous retiendrons et qui fait l'objet du chapitre suivant.

.

# **Chapitre III. MODELISATION DU RUISSELLEMENT DANS UN SYSTEME DE RAIES ET DE L'IMPACT DE LA SUBMERSION SUR LA CULTURE DE BETTERAVE A SUCRE**

## **III.1. Rappel du contexte et de la problématique**

Les expérimentations menées dans le cadre de cette thèse (objet du chapitre II) ont mis en exergue le rôle primordial du drainage de surface par le biais du nivellement et des raies pour l'évacuation des excédents d'eau durant la période hivernale avec pour conséquence l'amélioration des rendements dans le contexte du Gharb. Les parcelles nivelées avec ou sans raies n'ont été sujettes à aucun excès d'eau. Par contre, la parcelle non nivelée a connu des stagnations ayant durée plusieurs jours. Les résultats ont été obtenus expérimentalement pour 3 années climatiques, période assez courte pour une analyse du système étudié à l'échelle temporelle et des phénomènes extrêmes. C'est dans ce sens que l'apport de la modélisation s'avère être pertinent.

En effet, par le biais de la modélisation, nous pourrions extrapoler à des années plus ou moins pluvieuses. L'échelle spatiale est la parcelle cultivée, de l'ordre de l'hectare, et l'échelle temporelle est la campagne agricole. Les principales questions posées : (i) quelles sont les performances hydrauliques et hydrologiques du drainage de surface par le biais du planage et des raies ? (ii) Quel est l'impact du déficit de ruissellement (submersion) sur le rendement de la culture ? et (iii) Comment valoriser l'eau d'irrigation dans de telles conditions ? En fait, la comparaison portera sur 3 parcelles :

- 1- nivelée dotée de raies longues ;
- 2- nivelée sans raies ;
- 3- non nivelée.

## **III.2. Modélisation du système de raies modernisées (cas de la parcelle nivelée dotées de raies longues irriguée gravitairement)**

Le périmètre du Gharb est le plus important périmètre aménagé en grande hydraulique du Maroc. La superficie équipée actuellement est de 120 000 ha avec environ 100.000 ha (dont 13.500 ha pour le riz) pour le gravitaire et 19.700 ha pour l'aspersion. A côté de la grande hydraulique, un secteur très important d'irrigation privée s'est développé au fil des années (86.000 ha). En matière de pratiques d'irrigation gravitaire, on retrouve les 3 modes suivants : (i) la raie longue (raies de 80 à 130 m de long mises en place sur 18.000 ha) ; (ii) la robta

(dispositifs courts, mis en place sur environ 78.500 ha) ; et (iii) le Bassin à fond plat (technique de submersion, mis en place sur 13.500 ha).

Si la raie longue faisait partie des plans d'aménagement du périmètre au niveau parcellaire, force est de constater que cette pratique n'a pas reçu d'écho favorable auprès des agriculteurs. Toutefois, les recherches entreprises pour définir les modalités de son utilisation furent, sujettes à de nombreuses publications à des fins de vulgarisation (Demontis, 1973). Ait Kadi *et al.* (1987) signalent que les ruptures des arroseurs, ouvrages en terre dominant les raies, peuvent conduire l'agriculteur à abandonner l'utilisation des siphons tubulaires et revenir à la conduite traditionnelle de l'eau avec la pratique du contre arroseur.

Actuellement, la raie demeure pratiquée dans les secteurs assolés en canne à sucre puisque les mouvements de terre sont limités à la reprise des sillons entre deux campagnes pour cette culture. Toutefois même au niveau de ces secteurs, il n'est pas rare de voir les agriculteurs procéder à une irrigation mixte (ruissellement, submersion et ruissellement), en installant des batardeaux espacés de 20 à 30 m dans le sens de l'irrigation. En pratique, l'agriculteur procède au remplissage de la première cuvette ; lorsqu'il juge que celle-ci a été suffisamment bien arrosée, il procède à l'ouverture des brèches au niveau du batardeau concerné pour laisser couler l'eau vers la cuvette aval. Toute la difficulté est de conduire ce type d'irrigation quand la culture présente des hauteurs importantes. Il va sans dire que l'installation des batardeaux a une conséquence directe sur la dégradation du nivellement et est plus exigeante en main d'œuvre.

L'irrigation à la robta est une pratique où l'apport d'eau aux cultures se fait selon le principe du ruissellement (pour l'amenée de l'eau au bassin) et de submersion (au niveau des bassins). C'est une méthode traditionnelle de montagne qui a connu un développement important au niveau de tous les périmètres marocains de grande hydraulique grâce à son adaptation à : (i) des petites tailles de parcelles issues d'un morcellement important entre les agriculteurs ; (ii) la dégradation du nivellement au niveau des parcelles. On rencontre aujourd'hui une panoplie de schémas concernant ce mode d'irrigation. Ces schémas diffèrent selon le type de culture et l'état de dégradation du nivellement de la parcelle (Taky, 2003).

A la lumière de ce qui précède, aussi bien pour la raie que la robta, tels qu'elles sont pratiquées actuellement dans le Gharb, il est certain que ces techniques sont non seulement inefficaces du point de vue du rendement agronomique mais aussi ne sont pas de nature à favoriser le ruissellement hivernal mais plutôt à favoriser les stagnations d'eau.

La modernisation de l'irrigation gravitaire est la solution clé pour faire face aux problèmes de gestion de l'eau dans le Gharb (transport de l'eau dans les conduites au lieu des canaux portés

à ciel ouvert). Il doit résulter de cet effort de modernisation une amélioration de l'efficacité hydraulique et agronomique de l'eau d'irrigation. Pour cela, il importe que l'effort de modernisation soit suivi d'une amélioration des pratiques de l'irrigation à l'échelle de la parcelle. La raie modernisée, compte tenu de ses performances sur les sols du Gharb comme cela a été démontrée par Mailhol *et al.*, 1999, constitue une alternative aux pratiques actuelles. Comme mentionné précédemment, notre échelle spatiale est la parcelle agricole nivelée dotée d'une pente régulière et uniforme dans le sens de l'écoulement des eaux. Il s'agit d'une parcelle drainée par tuyaux enterrés. Quant à l'échelle temporelle relative à la campagne agricole, elle peut être subdivisée en deux phases distinctes. La première, qui s'étale du semis des cultures jusqu'au printemps, et qui reste sujette à des excédents d'eau. La deuxième phase qui démarre au printemps jusqu'à la récolte et qui connaît un déficit hydrique nécessitant le recours à l'irrigation. En fait, durant la première phase les précipitations pourront générer du ruissellement, (nous sommes dans le cas de la parcelle nivelée dotée de raies). Comme évoqué précédemment, la parcelle nivelée dotée de raies n'a pas été sujette aux stagnations d'eau. Durant la période estivale, le recours à l'irrigation est primordial pour garantir les rendements suffisamment élevés. L'objectif de la modélisation est d'analyser les performances hydrauliques et hydrologiques de la raie longue vis à vis du drainage de surface en hiver et à des fins d'irrigations à partir du printemps. A cet effet, nous avons besoin d'un modèle de ruissellement pour l'évaluation des performances de la raie longue en matière du drainage de surface et pour éventuellement donner des consignes relatives au dimensionnement des ouvrages collecteur des eaux de ruissellement des parcelles irriguées à la raie. Cet aspect fera l'objet de la partie A ci-dessous. L'analyse des performances des systèmes de raies vis à vis de l'irrigation nécessiterait un modèle d'irrigation. Ceci sera relaté au niveau de la partie B.

## **A. Modélisation du ruissellement à travers le système de raies**

### **A.1. Etat de l'art**

Le ruissellement (comme déjà évoqué plus haut) est un phénomène complexe fortement dépendant des caractéristiques hydrodynamiques du sol, de la structure de l'épisode pluvieux et de l'échelle à laquelle le problème est abordé. Les modèles de simulation du ruissellement ont été développés soit à l'échelle globale du bassin versant (SCS, 1972 ; Diskin and Nazirov, 1995) où à l'échelle locale (1 à quelques m<sup>2</sup>). C'est souvent en référence à cette dernière que des modèles d'infiltration reconnus dignes d'intérêt eu égard à leur caractère prédictif ont été largement utilisés pour générer l'excès d'eau sujet au ruissellement (Green Ampt and Ampt 1911 ; Richards, 1931 ; Haverkamp *et al.*, 1990).

Les processus hydrologiques ont été modélisés par de nombreux chercheurs en se basant sur diverses techniques physiques, conceptuelles, analytiques et numériques. Refsgaard et Knudsen (1996) ont présenté des résultats d'une étude comparative des performances de plusieurs modèles de ruissellement. Ces modèles sont classés en deux catégories : les modèles globaux ou conceptuels et les modèles distribués. Les modèles globaux cherchent à prédire les relations pluies débits à l'échelle du domaine concerné (le bassin versant par exemple) quant aux modèles distribués ils s'efforcent de rendre compte de l'hétérogénéité du domaine en tenant compte par exemple de la topographie et/ou de la variabilité spatiale du contexte pédoclimatique. Ils permettent ainsi de décrire les processus à l'échelle des unités hydrologiques considérées homogènes. Ces modèles qui pour la plupart intègrent la mesure du ruissellement à l'exutoire d'un bassin versant comme élément de calibration, présentent peu d'intérêt eu égard à notre problématique.

Peu de modèles ont été développés et appliqués à l'échelle de la parcelle agricole. Dans le contexte de la modélisation hydrologique des bassins cultivés, la parcelle agricole est une large unité souvent considérée homogène vis-à-vis du type de culture et des conditions de sol. Un certain nombre d'auteurs ont adapté des modèles existant à cette échelle particulière (Kao, 1999) a proposé le modèle SIRUP. C'est un modèle conceptuel qui repose sur une fonction de production déterminée par deux réservoirs : le premier est celui qui génère le ruissellement. Il est linéaire et son paramètre de vidange varie en fonction de la profondeur de la nappe. Il peut générer le ruissellement selon les deux processus (i) hortonien en cas de forte pluie (ii) Dunne quand le paramètre de vidange tend vers 0. Le second réservoir est utilisé pour prélever l'évapotranspiration et contrôler la recharge de la nappe. Le ruissellement généré par le modèle SIRUP est ensuite routé vers l'aval de la parcelle. Un hydrogramme (géré par un troisième réservoir linéaire) a été utilisé pour le routage. Ce modèle a été calé et validé sur des données horaires de pluies et de ruissellement à la Jaillière (France). Les résultats obtenus sont satisfaisants et le modèle s'est avéré capable de reproduire les occurrences du ruissellement à l'échelle de la parcelle. Hammani (2002) a utilisé la fonction de production de SIRUP pour le développement d'un modèle couplant d'une manière spatialisée les écoulements souterrains et les écoulements de surface. La parcelle est discrétisée en un certain nombre de blocs centrés carrés correspondant aux mailles de discrétisation du modèle souterrain. Le modèle de ruissellement est appliqué à chaque maille en prenant en considération les échanges avec les différentes mailles avoisinantes. Dans l'approche utilisée la production et le transfert se font séparément. La fonction de production est calculée par des

bilans hydriques. En présence d'une dépression topographique, des accumulations d'eau par flacage se produisent dans la maille la plus basse de la dépression. Ces flaques disparaissent par infiltration. Les ruissellements générés par la fonction de production du modèle spatialisé se retrouvent directement aux extrémités de la parcelle quelque soit le pas de temps en raison du problème de « diffusion numérique ». Une façon d'empêcher le transfert instantané du ruissellement d'une maille à l'autre consiste à imposer un débit maximal à ruisseler. Avant qu'il ne soit couplé au modèle d'écoulement souterrain, le modèle d'écoulement de surface a été vérifié en utilisant des profondeurs de nappes mesurées. Cette vérification a permis de relever que le modèle de ruissellement est conservatif à l'échelle de la maille et de la parcelle. Le modèle SIRUP travaillant à une échelle globale de la parcelle et le modèle spatialisé à l'échelle de la maille constituent des outils intéressants pour l'évaluation de ruissellement à l'exutoire de la parcelle agricole. Le transfert dans les raies n'est pas considéré.

## **A.2. Modélisation du ruissellement hivernal par les raies**

Sur le plan de la physique du sol, le cas que nous traitons présente deux types de singularités. D'une part, les parcelles sont pourvues de raies d'irrigation vectrices de l'écoulement de l'eau. Cela pose le problème de l'utilisation des modèles de ruissellement classiques qui ne tiennent pas compte des techniques d'irrigation. D'autre part, les propriétés hydrodynamiques des sols du Gharb évoluent entre l'été (sols fissurés) et l'hiver (sols gonflant) ce qui nécessite le recours à des approches différentes pour l'évaluation du drainage de surface et de l'irrigation.

Sur le plan hydrique, la présence d'une nappe permanente peu profonde pose également la question du schéma à adopter (mécanisme Hortonien classique, (Horton, 1933) ou celui de Dunne (Dunne and Clark, 1970)), notamment dans un contexte de forte présence de drains enterrés (plus de 100.000 ha sur les 120.000 ha actuellement aménagés en Grande Hydraulique). Enfin, l'unité spatiale considérée, la parcelle, est en soi originale et constitue une unité intermédiaire entre les bassins versants et les placettes expérimentales. De ce fait, la parcelle agricole est trop petite pour appliquer les approches de la modélisation hydrologique classique (sans intérêt eu égard à notre objectif), et trop grande pour espérer extrapoler des résultats expérimentaux ponctuels à l'échelle de placettes. En conséquence, la spécificité du problème que nous avons à traiter nous a conduit à développer une modélisation adaptée au présent contexte. Le modèle de ruissellement développé dans le cadre de ce travail couple une fonction de production, selon l'approche physique de Green et Ampt (1911), et un modèle de transfert de l'eau le long des raies selon le concept de l'onde cinématique.

## Using a furrow system for surface drainage under unsteady rain

A. Taky<sup>1</sup>, J.C. Mailhol<sup>2\*,\*</sup>, G. Belaud<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (ORMVAG), Kenitra Morocco

<sup>2</sup>Cemagref, UMR G-EAU, BP 5095, 34160 Montpellier cedex 05 France

<sup>3</sup>Institut de Recherche pour le Développement, UMR G-EAU, Maison des sciences de l'eau 300 Av E. Jeanbrau, 34095 Montpellier Cedex 05, France

### Abstract

Water excess during winter limits crop development on heavy clay soil conditions of the Gharb valley (Morocco). The furrow system to eliminate these negative effects is the adopted solution. This article focuses on the development of a water transfer model through a furrow system during unsteady rainfall event to evaluate the runoff volume resulting from a reference rainy event. This model contains a production function associated to a transfer function. The production function is based on the Green-Ampt infiltration equation. The latter has been adapted to account for unsteady rain conditions and rainfall intermittence. The transfer function is based on the kinematic wave model, the explicit solution of which is coupled with the water excess generated by the production function. Simulated runoff in the furrows is collected by a drainage ditch evacuating the flow outside a plot of 1.3 ha. The similarity between parameters of a furrow irrigation model and those of the production function is advantageously used for model calibration.

The proposed modelling approach shows capabilities to predict water amount and peak discharges evacuated from a plot of around 1 ha by a furrow system under unsteady rainfall events. As an application, it is used to evaluate the ability of the surface drainage system to evacuate the excessive volumes of water under typical rainfalls.

**Key words:** Runoff, furrow system, unsteady rainfall, overland flow, kinematic wave model.

---

\* Corresponding author. Tel.: +33 4 67 046346; fax: +33 4 67 166440.  
E-mail address: jean-claudemailhol@cemagref.fr (J.C. Mailhol).

## List of symbols

- $A$  : wetted area in the furrow ( $\text{m}^2$ )  
 $A'$  : derivative of  $A$  with respect to  $Y$  ( $A' = dA/dY$ )  
 $a$  : parameter of the Montana equation ( $\text{m/s}^b$ )  
 $b$  : parameter of the Montana equation (-)  
 $CE$  : coefficient of efficiency (-)  
 $D$  : characteristic duration of the one year return period rainfall (s)  
 $dt$  : time step in the transfer model (s)  
 $dx$  : space step in the transfer model (m)  
 $h$  : capillary suction (m)  
 $h_i$  : initial capillary suction (m)  
 $h_f$  : the capillary suction at the wetting front (m)  
 $FL$  : furrow length (m)  
 $fs$  : inter-furrow spacing (m)  
 $I$  : cumulative infiltration during a rainy event (m)  
 $I^k$  : cumulative infiltration (m) during the rainfall event  $k$   
 $I_f$  : cumulative infiltration during furrow irrigation (m)  
 $I_{rp}$  : cumulated rainfall (m)  
 $J$  : the friction slope (m/m)  
 $k$  : rainfall event number  
 $K_s$  : saturated conductivity (m/s)  
 $L_f$  : length of the infiltration front (m)  
 $m$  : wall slope of the furrows (-)  
 $n$  : roughness coefficient ( $\text{s/m}^{1/3}$ )  
 $N$  : number of furrows  
 $P$  : wetted perimeter (m)  
 $P_I$  : cumulative rainfall for the one year return period (mm)  
 $q$  : infiltration rate (m/s)  
 $q_c$  : infiltration capacity (m/s)  
 $q_r$  : rainfall intensity (m/s)  
 $Q$  : flow rate in the furrow during runoff ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $Q'$  : derivative  $Q$  with respect to  $Y$  ( $Q' = dQ/dY$ )  
 $Q_p$  : peak discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $R$  : runoff (m/s)

$r = Rfs$  : lateral contribution due to runoff on a width  $fs$  ( $m^2/s$ ),

$R_h$  : hydraulic radius (m)

$S_0$  : field slope (m/m)

$t$ : current time (s)

$T_a(x)$  : advance time of the water front during an irrigation event (s)

$t_B$  : time of rain event beginning (s)

$t_B^k$  : time when the  $k$ -th rainfall event begins (s)

$t_E^k$  : time when the  $k$ -th rainfall event stops (s)

$t_p$  : ponding time (s)

$x$ : furrow abscissa (m)

$Y$ : water depth (m):

$Z_r$  : a reference soil depth (1 m)

$\alpha$  : parameter of the  $K(h)$  equation ( $m^{-1}$ )

$\beta$  : parameter of the soil water depletion function

$\lambda_c$  : capillary length (m)

$\chi$  : parameter ruling the macro pore effect in the irrigation model

$\Delta\theta$  : saturation deficit

$\Delta t$ : calculation time step (s)

$\Delta x$ : calculation space step (m)

$\theta$  : water content ( $cm^3/cm^3$ )

$\theta_B^k$  : water content ( $cm^3/cm^3$ ) at the beginning of the rainfall event  $k$

$\theta_E^k$  : water content ( $cm^3/cm^3$ ) at the end of the rainfall event  $k$

$\theta_s$  : saturated water content ( $cm^3/cm^3$ )

$\theta_c$  : water content at field capacity ( $cm^3/cm^3$ )

$\theta_i$  : initial water content ( $cm^3/cm^3$ )

$\sigma$  : a shape parameter of the furrow  $\sigma = (1+m^2)^{1/2}$

$\tau$ : current time between  $-D$  and  $+D$  in the one year return period rainfall formulation (s)

Note: Numerical values of variables may be given in different units in the text and figures.

## 1. Introduction

Rainfall excess on the heavy clayey soils of the Gharb valley (Morocco) strongly limits the production of crops sown during winter. The subsurface drainage system, the main role of which is to maintain the level of the saline groundwater deep enough, does not allow a

complete and fast evacuation of this water excess (Bouarfa and Zimmer, 2000), due to the absence or degradation of land levelling. Considering energy costs and maintenance problems, sprinkler irrigation has often been replaced by traditional surface irrigation (Mailhol *et al.*, 1999).

Impacts of water excess during winter on crop growing in unlevelled plots are clearly shown in Taky *et al.* (2005). This work also highlights the beneficial role of a furrow system on crop production (sugar beet) for both experimental and farmer plots. To encourage farmers adopting modern surface irrigation systems, furrow irrigation tests were conducted on 180 to 240 m long laser levelled plots, and water was supplied using siphons, floppy pipes or rigid gated pipes. The furrow system, designed for water supply during the irrigation season, also allows the evacuation of excessive rainfall amounts during winter.

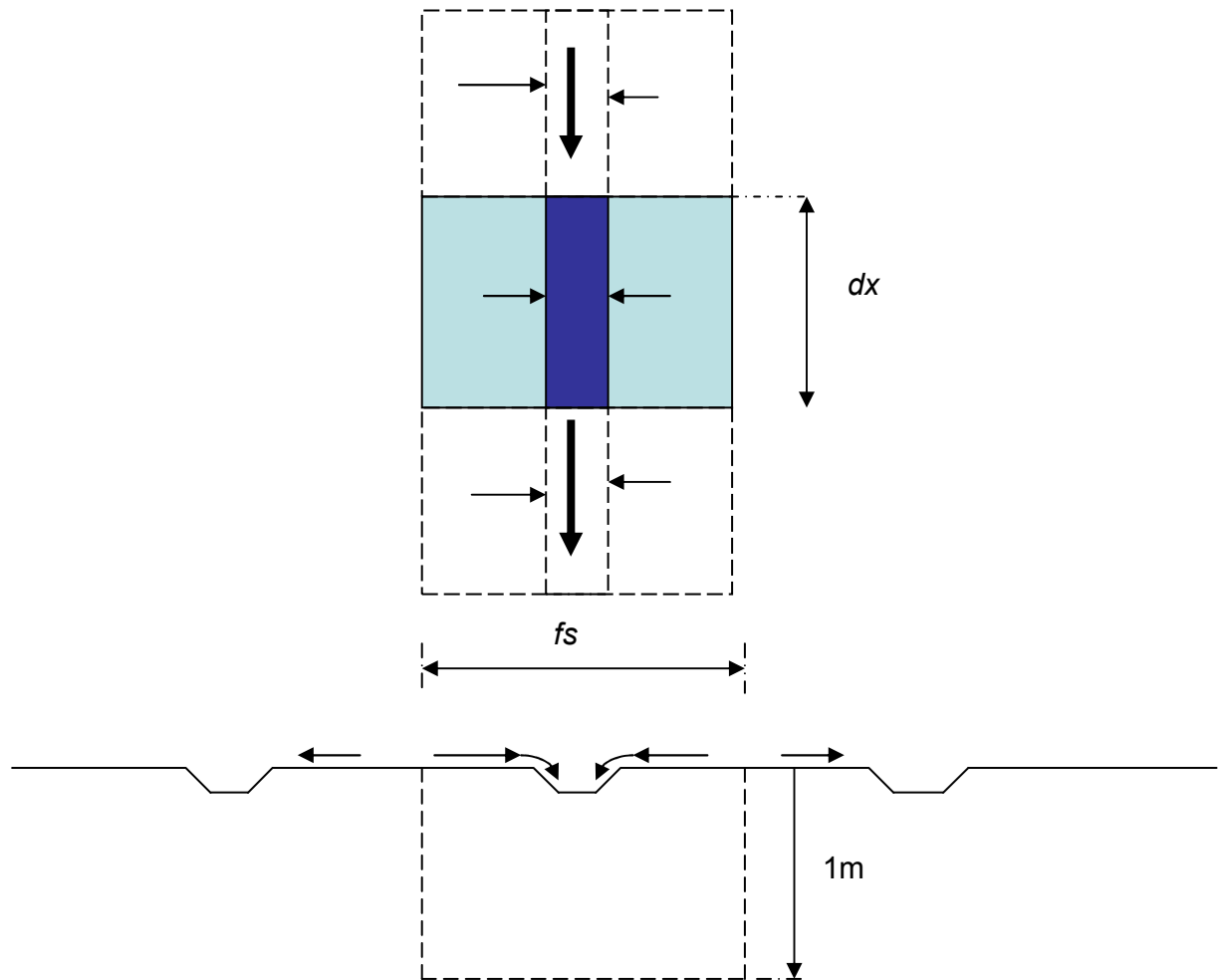
The objective of this article is to present a numerical model allowing a runoff prediction within a furrow system submitted to complex rainfall events. Overland flow modelling under constant rain intensities has been addressed by several researchers using a two dimensional approach (Chow and Ben-Zvi, 1973; Zhang and Cundy, 1989; Taylor *et al.*, 1993). More recently Esteves *et al.* (2000) proposed a comparable approach for complex rainfall events. Their overland flow model results from a coupling of the Green-Ampt infiltration solution with the Saint-Venant solution used for the surface transport.

The previous studies all refer to small-scale plots of a few square-meters. At this scale, runoff is subject to micro topography and a 2D-modelling approach is required for the surface water transport. Muños-Carpena *et al.* (1998) also used the Green-Ampt model coupled with the kinematic wave model for sediment transport simulation in vegetative filter strips. Paige *et al.* (2002) used a similar modelling approach with a rainfall simulator and analyzed the sensitivity of the runoff response to the rainfall rate. These two latter researches refer to a plane surface and the kinematic wave solution is not described.

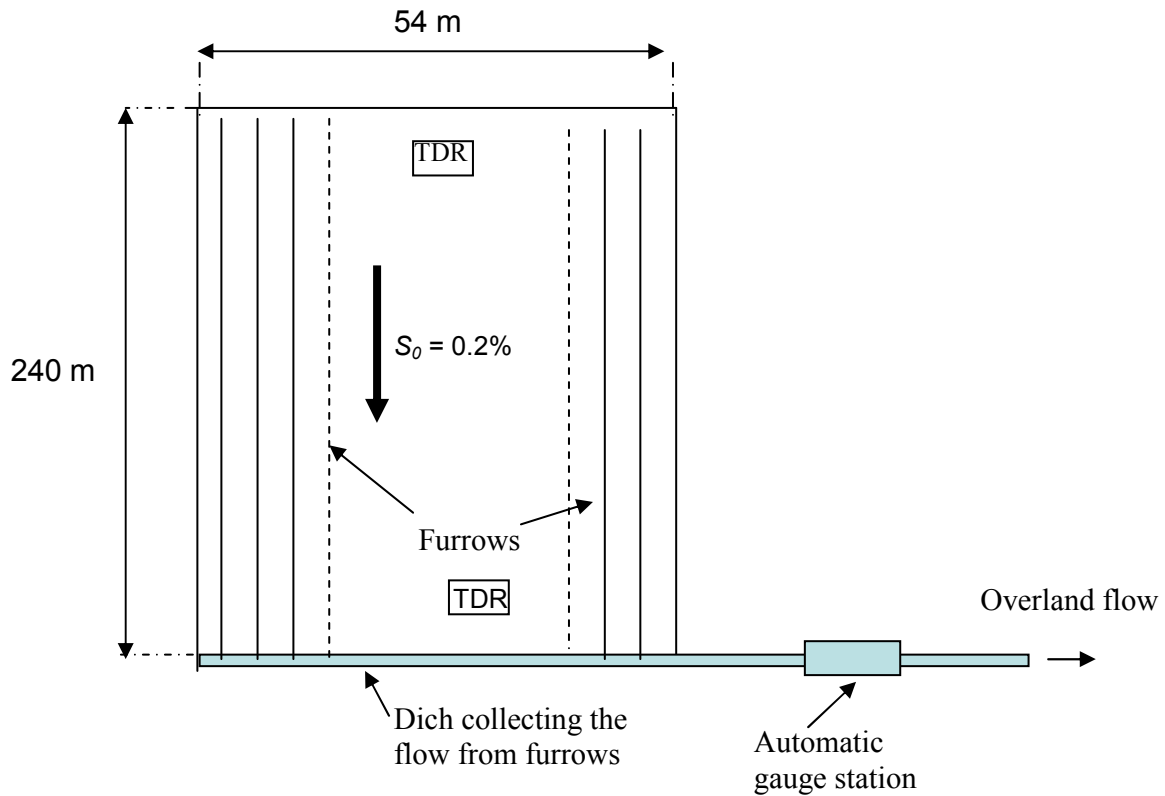
Although soil properties of the experimental plot are assumed to be spatially constant, the originality of the present work is to propose a runoff transfer model through a furrow system model applicable at a plot scale of around 1 hectare. In addition, the production function is based on an infiltration model that uses the same parameters as the ones used to simulate the furrow irrigation. This runoff model is a useful tool to design the ditches for the runoff evacuation of a whole system of furrow irrigated plots. It could be considered as a component of a future integrated modelling approach for simulating furrow irrigation practices at the plot and season scale in the Gharb valley.

## 2. Model development

The hydrological model consists of a production function generating a water excess at the scale of an elementary sub-plot (Figure 30) coupled with an overland flow model transferring the water excess through a furrow system. The simulated plot is composed of  $N$  furrows of length  $FL$ . These furrows outflow in a ditch at the extremity of which was installed an automatic gauge station (Figure 32).



**Figure 30.** Overview of the infiltration-runoff process at the scale of an elementary sub-plot



**Figure 31.** Overview of the plot during the winter period

## 2.1. Production function

The production function calculates the water excess at the scale of the elementary sub-plot of width  $f_s = 1.5$  m (furrow spacing) and of length  $dx$ , the transfer space step. This water excess is assumed to instantaneously supply a furrow element. Since water heights within the furrows are generally low, infiltration along their walls can be neglected. Consequently, infiltration will be globally considered as being governed by a 1D process. This production function needs to manage intermittent rainfall. A rainfall episode, the duration of which can be of one or two days, constitutes continuous rainfall events at different rates separated by no rain periods. For an unsteady rain event, there may exist different periods during which rainfall rate is greater than infiltration capacity. Under such circumstances, several ponding times can be generated while there is at most one ponding time under steady rain conditions.

This production function uses the Green-Ampt infiltration model (Green and Ampt, 1911) as a simplified approach of the infiltration process. It assumes a homogenous soil profile and an initial water content  $\theta_i$  uniformly distributed with depth. According to this model, the advancing front in the soil separates a saturated zone and a zone still at initial soil moisture. Mein and Larson (1973) and Swartzendruber (1974) used this model to describe ponded infiltration with constant intensity rainfall conditions. This model was also applied

under unsteady conditions (Chu, 1978; Esteves *et al.*, 2000). Muños-Carpena *et al.* (1998) also used the Green-Ampt approach with the method of Chu (1978) to account for the water amount infiltrated before ponding. Paige *et al.* (2002) used a same modelling approach with a rainfall simulator and performed a sensitivity analysis of runoff response to the rainfall rate. They showed that runoff is sensitive to rainfall intensity and initial moisture content. They also showed that a unique hydraulic conductivity parameter is not sufficient to correctly simulate the runoff peak on a surface with bare soil and vegetation especially in case of high rainfall intensities. A significant improvement of the simulations was obtained on the basis of a strip model configuration after tuning a second effective conductivity.

### 2.1.1 Runoff production during a rainfall event

Infiltration is composed of two stages. As described by Mein and Larson (1973), when the rain intensity  $q_r$  is lower than infiltration capacity  $q_c$ , all the rain infiltrates into the soil and actual infiltration rate  $q$  is equal to  $q_r$ . Cumulative infiltration  $I$  is equal to cumulative rain  $I_{rp}$ . This is valid as long as the rain intensity is lower than the infiltration capacity  $q_c$ . To calculate the infiltration capacity, the Green-Ampt approach is used, where the ponding time  $t_p$  is the time at which  $q = q_r = q_c$ . According to Green-Ampt's model, the depth of the saturated zone (in which  $\theta = \theta_s$ ) is given by

$$L_f = I_{rp} / \Delta\theta \quad \text{Equation 1}$$

where  $L_f$  is the position of the wetting front,  $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$  is saturation deficit (saturation moisture minus initial moisture) and  $I_{rp}$  is the cumulated rainfall from the rain event beginning ( $t_B$ ) until the ponding time. The application of the Darcy's equation gives the infiltration capacity for ponded conditions:

$$q_c = K_s + K_s \frac{|h_f|}{L_f} \quad \text{Equation 2}$$

where  $K_s$  is saturated conductivity and  $h_f$  is the capillary suction at the wetting front. After ponding ( $t > t_p$ ), infiltration  $q$  equals infiltration capacity  $q_c$  and the cumulative infiltration is calculated as follows:

$$I = I_{rp} + \int_{t_p}^t q_c(t) dt \quad \text{Equation 3}$$

The infiltration capacity is calculated according to Equation (2) in which the wetting front position is given by

$$L_f = I / \Delta\theta \quad \text{Equation 4}$$

A similar approach was used by Chu (1978) who integrates Equation (3) and gets a relation between  $I$  and  $t$ . A numerical method is required to determine  $I$  then its derivative  $q$ . Focussing on the infiltration rate  $q$  (rather than the cumulative infiltration), it is more convenient to solve Equations (2) and (4) at each calculation time step, which is done using an explicit numerical scheme.

Finally, runoff  $R(t)$  is obtained by the difference between rain intensity and infiltration capacity:

$$R(t) = q_r - q_c \quad \text{Equation 5}$$

The water excess at the soil surface of the elementary sub-plot is assumed to be quasi instantaneously evacuated by the furrow system and consequently the resulting positive pressure head at the soil surface is not considered. Saturated conductivity  $K_s$  is assumed constant and not affected by the rainfall rate, the air entrapment phenomenon not being considered here.

### 2.1.2. Soil parameters

A physical signification of  $h_f$  has been proposed by some authors. Newman (1976), for instance, has shown that

$$h_f = \frac{1}{K_s} \int_0^{h_i} K(h) dh \quad \text{Equation 6}$$

,where  $h_i$  is initial capillary suction.

In the frame of the validity of the Green-Ampt model [the delta Soil as defined by Philip (1957; 1973)]  $h_f \approx -\lambda_c$  (capillary length) using the Gardner function, where saturated conductivity is assumed to increase exponentially with  $h$  (Gardner, 1958):

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad \text{Equation 7}$$

The value of  $\alpha^{-1} = \lambda_c$  is the macroscopic capillary length scale (Philip, 1984; White and Sully, 1987; Thony *et al.*, 1991) which is a hydraulic characteristic of the soil. From a physical point of view  $\lambda_c$  represents the average height of the capillary fringe. It is numerically equivalent to the soil water pressure head  $|h_f|$  at the wetting front (Kutilek and Nielsen, 1994). It varies from 3 to 5 cm for sand to 25 cm (White and Sully, 1987) and more for clay (Kutilek and Nielsen, 1994; Mailhol, 2003).

### 2.1.3. A new procedure to account for rainfall intermittence

When the rainfall stops, the soil water depletion phase starts. Its duration depends on the occurrence date of the next rainfall event. The soil moisture conditions for predicting the infiltration capacity of the subsequent rainfall event need to be updated. Since the rain duration is quite short, generally less than one day, evapotranspiration is neglected. Denoting  $t_B^k$  the time when the  $k$ -th rainfall event begins,  $t_E^k$  when it stops; the corresponding soil moistures are denoted  $\theta_B^k$  and  $\theta_E^k$ . At the end of the rainfall event  $k$ , averaged soil water content on a reference depth  $Z_r$  is given by:

$$\theta_E^k = \theta_B^k + I^k/Z_r \quad \text{Equation 8}$$

where  $I^k$  = cumulative infiltration (m) during the rainfall event  $k$  and  $Z_r$  is the reference soil depth (m). A reference soil depth  $Z_r = 1$  m is assumed to be a valuable depth to account for Hortonian infiltration processes under high clayey soil conditions. At the beginning of the depletion stage ( $t \geq t_E^k$ ), soil water content decreases rapidly from  $\theta(t) = \theta_E^k$  ( $\theta_E^k \leq \theta_s$ ) until it reaches the field capacity, then the depletion is much slower (Marcesse, 1967). The soil water content at field capacity is denoted  $\theta_{fc}$ . Because runoff is specific to the winter period, where  $\theta$  is usually greater than  $\theta_{fc}$ , the first depletion phase will be only considered. The depletion process is simulated as follows:

$$\theta(t) = \theta_{fc} + (\theta_E^k - \theta_{fc}) \exp[-\beta(t - t_E^k)] \quad \text{Equation 9}$$

in which  $\beta$  is an empirical coefficient depending on soil properties and soil conditions. Its value reflects the velocity at which the soil drains. At the beginning of the next rainfall event  $k + 1$ , the soil water content is equal to  $\theta_B^{k+1} = \theta_{fc} + (\theta_E^k - \theta_{fc}) \exp[-\beta(t_B^{k+1} - t_E^k)]$ . From this moisture, the infiltration capacity at the beginning of rainfall event  $(k+1)$  is calculated according to Equations (1) and (2).

## 2.2 Transfer model

### 2.2.1. Model equations

The slope of the furrows is generally greater than 0.1%. In this range, the kinematic wave model is a good approximation of the Saint-Venant's transfer equations (Woodhiser and Liggett, 1967) for the runoff generated by each elementary sub-plot. This model is often used to simulate the advancing front in furrow irrigation (Walker and Humpherys, 1983) but with different boundary conditions.

The kinematic wave solution combines the following set of equations:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} = r \quad \text{Equation 10a}$$

$$S_0 = J = n^2 \frac{Q^2}{A^2 R_h^{2/3}} \quad \text{Equation 10b}$$

where  $A$  is the wetted area in the furrow ( $\text{m}^2$ ),  $t$  the current time (s),  $Q$  the discharge in the furrow ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $r = R fs$  the lateral contribution due to runoff on a width  $fs$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $S_0$  the furrow slope (m/m),  $J$  the friction slope,  $n$  the Manning roughness coefficient ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ) and  $R_h$  is the hydraulic radius (m) defined as  $A/P$  ( $P$  = wetted perimeter).

The boundary conditions are:

$$\text{At } t = 0, A(x, t) = 0 \text{ for all } x \quad \text{Equation 11a}$$

$$\text{At the upstream end } (x = 0), A = 0 \text{ for all } t. \quad \text{Equation 11b}$$

Each furrow supplies the ditch which conveys the whole flow out of the plot. Due to the depth of the ditch, a free drainage boundary condition is set at the furrow downstream end. The kinematic wave solution of Equations (10a, b) is also used for simulating the flow in the ditch, in which lateral contribution is the outlet discharge of each furrow. This set of equations is solved numerically according to an explicit scheme described below.

### 2.2.2. Numerical solution

The furrow is discretized with a constant length step  $dx$ . The simulation period is discretized with a time step  $dt$ . The discretized variables  $A$  and  $Q$  at the  $i$ -th space step and  $j$ -th time step are denoted  $A_i^j$  and  $Q_i^j$ . The terms of Eq (10a) are approximated at the first order as follows:

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx \frac{1}{2dt} [(A_i^{n+1} - A_i^n) + (A_{i+1}^{n+1} - A_{i+1}^n)] \quad \text{Equation 12a}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{1}{2dx} [(Q_{i+1}^n - Q_i^n) + (Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1})] \quad \text{Equation 12b}$$

$$r \approx \frac{1}{2} (r^{n+1} + r^n) \quad \text{Equation 12c}$$

At the  $(n+1)$ -th time step, the values at the  $(i+1)$ -th abscissa are searched as functions of the values in  $i$  and those of the  $n$ -th time step. Two unknown terms need to be determined,  $A_{i+1}^{n+1}$  and  $Q_{i+1}^{n+1}$ . The finite differences in the system of Equations (12a, b, c) are replaced using the following first-order approximations, in which the unknown is the water depth  $Y_{i+1}^{n+1}$ :

$$A_j^{n+1} - A_j^n \approx (Y_j^{n+1} - Y_j^n) A_j^n, \quad j = i, i+1, \quad \text{Equation 13a}$$

$$Q_{i+1}^k - Q_i^k \approx (Y_{i+1}^k - Y_i^k) Q_j^k, \quad k = n, n+1, \quad \text{Equation 13b}$$

in which  $A'$  and  $Q'$  denote the derivatives of  $A$  and  $Q$  with respect to the water depth  $Y$ . The calculation of  $Q'$  uses the Manning roughness formula (10b). The details of the calculation are given in appendix (annexe III). Finally, replacing the partial derivatives in Equation. 10a with the approximated finite differences leads to the following equation:

$$Y_{i+1}^{n+1} \left[ A_{i+1}^n + \frac{dt}{dx} Q_i^{n+1} \right] = Y_{i+1}^n A_{i+1}^n - (Y_i^{n+1} - Y_i^n) A_i^n + \frac{dt}{dx} \left[ (Y_i^n - Y_{i+1}^n) Q_i^n + Y_i^{n+1} Q_i^{n+1} \right] + (r^{n+1} + r^n) dt$$

**Equation 14**

which gives  $Y_{i+1}^{n+1}$  explicitly. To avoid numerical instabilities, the Courant number,  $\frac{Q\Delta t}{A\Delta x}$ , of this explicit scheme should be close to 1 (Cunge *et al.*, 1980).

### 3. Field Experiments

The studied plot belongs to an experimental station in the Gharb valley managed by ORMVAG (Kenitra, Morocco). The soil is mainly clayey (65-70%) with sand (20-30%). During summer it develops large cracks under high water deficit conditions (Mailhol *et al.*, 1999). The plot was 230 m long and 50 m wide and was laser levelled with a slope  $S_0 = 0.2\%$ . Sugar beet was cultivated for two years: 2004-2005 and 2005-2006. For both, it was planted at mid November after a furrow ridging, then furrow irrigated. The furrow spacing  $f_s$  was 1.5 m. Average furrow shape was trapezoidal with a side slope  $m \approx 1/2$ , and a bottom width and a maximal depth of 0.15 m. At the extremity of the plot, runoff from furrows was collected by a trapezoidal ditch with a bottom width of 0.5 m and a slope of 0.25%.

A complete meteorological station located on the experimental site recorded rainfall events thanks to an automatic rain-gauge system with a recording time step of 15 min. To measure the outflow, a triangular flume equipped with an ultrasonic sensor was installed in November 2004 at the downstream end of the ditch. Instantaneous outlet discharges were automatically recorded at a time step of 15 min by a SAB600 (LMU) system supplied by an electrical solar panel.

Five significant runoff events (peak discharge  $Q_p \geq 1$  L/s) occurred and were monitored during the two seasons. Two events had a peak discharge close to 8 L/s (March 2005, January 2006), a third one had a peak close to 4 L/s (March 2006) while the 4<sup>th</sup> (November 2004) and the 5<sup>th</sup> (February 2006) had a peak of 2 L/s and 1 L/s respectively. For soil water content monitoring, two sites (upstream and downstream part of the plot) were equipped with two 30-cm CS6115 Cambell TDR probes inserted into the soil in the vicinity of the crop lines.

During the irrigation campaign of 2005, two irrigation events were monitored, on April 2<sup>nd</sup> (3<sup>rd</sup> irrigation) and June 6<sup>th</sup> (6<sup>th</sup> irrigation). Just before these two irrigation events, the soil

water content profile was established by the gravimetric method on 1 m depth. Inlet discharge supplied by the gated pipe system was measured by means of trapezoidal flumes (RBC type) well adapted for low discharge (Walsh *et al.*, 2005). Total input discharge was controlled by a volumetric valve too. The advance trajectories of 18 furrows were monitored by determining the advance times  $T_a$  at nine abscissas. This experimental setup allowed the calibration of the hydraulic characteristics of the soil.

#### 4. Model Calibration and Validation

The model consists of a production function, which yields the volume of water drained out of the plot, and a transfer function that represents the propagation of the flow from the plot to the outlet. For the production function, five parameters need to be calibrated:  $\theta_s$ ,  $\theta_i$ ,  $\beta$ ,  $\lambda_c$ , and  $K_s$ . These parameters are first calibrated, so that the model correctly represents the runoff volume. Some of these parameters are hydraulic characteristics of the soil and may be adjusted independently of the rainfall events. To this end, these parameters were calibrated on the irrigation events of April and June 2005. In a second step, the transfer function was calibrated so that it correctly represented the delay process within the drainage system. The transfer function introduces one more parameter, the Manning roughness coefficient. The surface flow conditions are rather different during furrow irrigation and during rainfall, and this Manning coefficient should be calibrated separately in each condition.

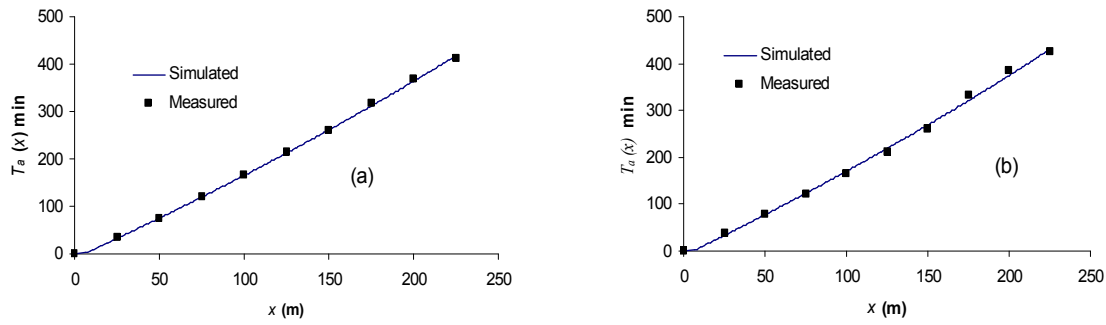
##### 4.1. Calibration during irrigation events

The capillarity fringe  $\lambda_c$  and the hydraulic conductivity  $K_s$  are hydraulic characteristics of the soil that can be determined during irrigation events. To this end, we use the infiltration equation developed by Mailhol (2003) to simulate the furrow irrigation process:

$$I_f(t) = 0.9 \lambda_c \Delta\theta [ 1 - \exp (\chi K_s (\lambda_c \Delta\theta)^{-1} t ) ] + K_s t \quad \text{Equation 15}$$

where  $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$  and  $\chi$  is an empirical factor set at values greater than or equal to 80 for heavy cracking soils, and close to 10 without or under weak cracking soil conditions. Unlike the Green-Ampt equation, Equation (15) enables to account for the role played by the macroporosity that can be quasi instantaneously filled by an important water amount (Mailhol and Gonzalez, 1993). The  $\chi$  parameter indeed allows us to reduce or to increase the role of macroporosity in the infiltration process, giving thus more flexibility to the model. Parameters  $\lambda_c$  and  $K_s$  are involved in the exact analytical advance solution of the water balance equation. They are derived from the advance monitoring of an irrigation event by an inverse method (Mailhol, 2003; Mailhol *et al.*, 2005).

Saturated soil water content  $\theta_s = 0.45$  was obtained from laboratory experiments during which the TDR calibration was performed by the method of Quinones *et al.* (2003). The initial soil moisture  $\theta_i$  is measured (average value on 1 m depth) just before irrigation. The irrigation event of April 2005 is used for parameter calibration while that of June is used for parameter validation. The average discharge at the furrow head is 1.15 L/s for both irrigations. For the downstream discharge (RBC flume measurements), the coefficient of variation is about 10%. For the advance times  $T_a(x)$ , the coefficient of variation is between 7 and 17%, which is consistent with the variation on the head discharges. Figure 32a shows the calibration result on the advance trajectory ( $T_a$ ) of the median furrow for a  $\Delta\theta$  value of 0.18, while Figure 32b presents the validation step for  $\Delta\theta = 0.20$ . For both irrigation events, the roughness coefficient  $n$  is set to 0.04 (Mailhol and Gonzalez, 1993; Mailhol, 2003; Mailhol *et al.*, 2005). The derived parameters from the furrow irrigation model are  $\overline{\lambda_c} = 40$  cm and  $\overline{K_s} = 0.3$  cm/h.



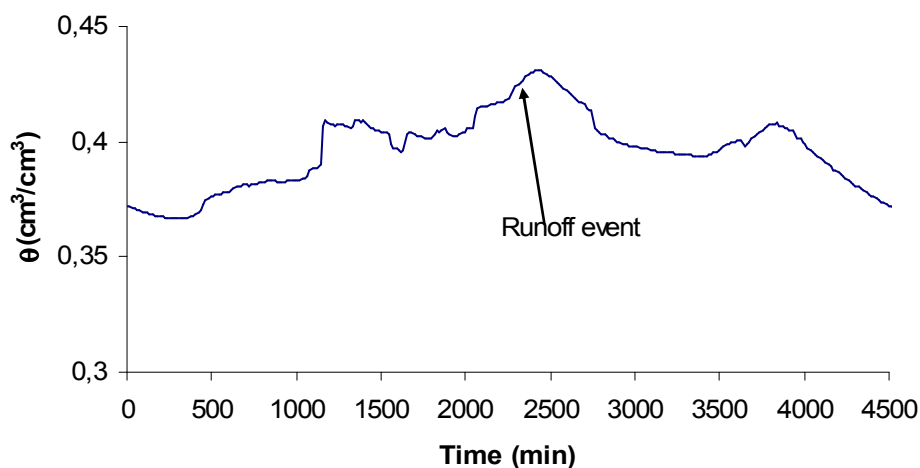
**Figure 32.** Calibration of  $\lambda_c$  and  $K_s$  on the median furrow for the 3<sup>rd</sup> irrigation event (a) and validation on the 6<sup>th</sup> irrigation event (b) of 2005

#### 4.2. Model calibration during rainfalls

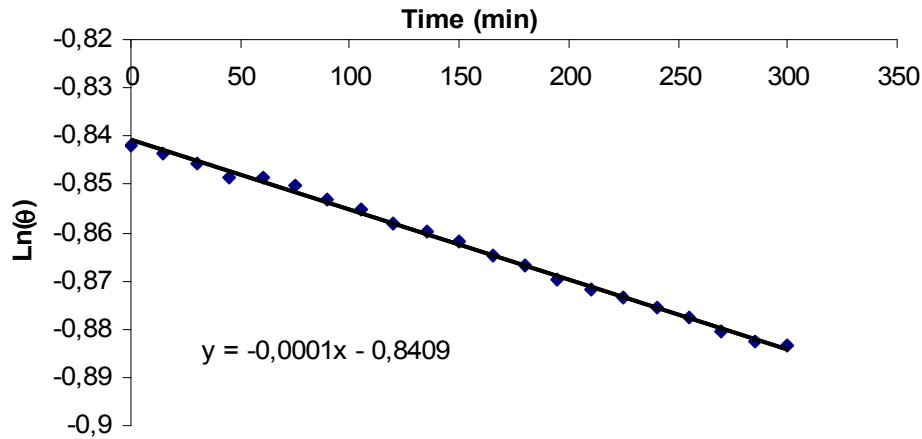
The runoff event of March 2005 is used for model calibration, the other ones being used for model verification. The runoff of March 2005 event represents 7 mm out of a total rain of 21 mm fallen the 4<sup>th</sup> of March in 10 hours, from 3 am to 1 pm. The events were simulated with a space step  $dx = 1.5$  m. The time step was set to 1 s, which insured Courant number to be close to 1. Since the rain depth is measured every 15 min, the rain intensity is assumed constant during this time interval.

The calibration is composed of two steps. The first refers to the parameters of the production function while the second refers to  $n$ , the transfer model parameter. For the first step, the production function was disconnected from the transfer function. The parameters of

the production function are set to the values obtained from irrigation monitoring. For the soil parameters, a value of 40 cm for  $\lambda_c$  (assimilated to  $-h_f$  in the Green-Ampt model) and 0.3 cm/h for  $K_s$  are adopted. Initial soil water content  $\theta_i$  is derived from TDR measurements. The value which is taken into consideration corresponds to the beginning of the rainfall event initiating runoff. In March 2005, the value  $\theta_i = 0.43$  is obtained (Figure 33), which is close to saturation. Parameter  $\beta$ , governing the fast drainage function, is obtained from the soil water depletion curve (Figure 34) from the end of the considered rainy event. The following set of parameters is obtained:  $\beta = 0.00007$ ,  $\theta_i = 0.43$ ,  $\lambda_c = 40$  cm,  $K_s = 0.3$  cm/h. The corresponding simulations resulted in slightly under-estimated values of the runoff (6 mm instead of 7 mm). Indeed, infiltration process under furrow irrigation is different from that existing under a rainy event. Under furrow irrigation, water infiltrates the soil on the furrow surface, resulting in a 2D process, while infiltration occurs on the inter-furrow area during rainfalls. After tuning parameter  $K_s$ , a slight improvement was obtained with  $K_s = 0.2$  cm/h instead of 0.3 cm/h, the value derived from the furrow model. The difference in these  $K_s$  values can result from a difference of the soil temperatures between winter and summer (or end of spring) according to Heasom *et al.* (2006), causing differences in water viscosity. For instance, for 2005, the daily average temperature of January is 8°C while that of May is 19°C, causing the water viscosity to be 1.4 times lower in May than in June. This is consistent with variations of  $K_s$ .



**Figure 33.** Evolution of volumetric water content measured by TDR (averaged values of the two sites) from 03/03 at 0 h AM to 03/06 at 3.00 AM in 2005.



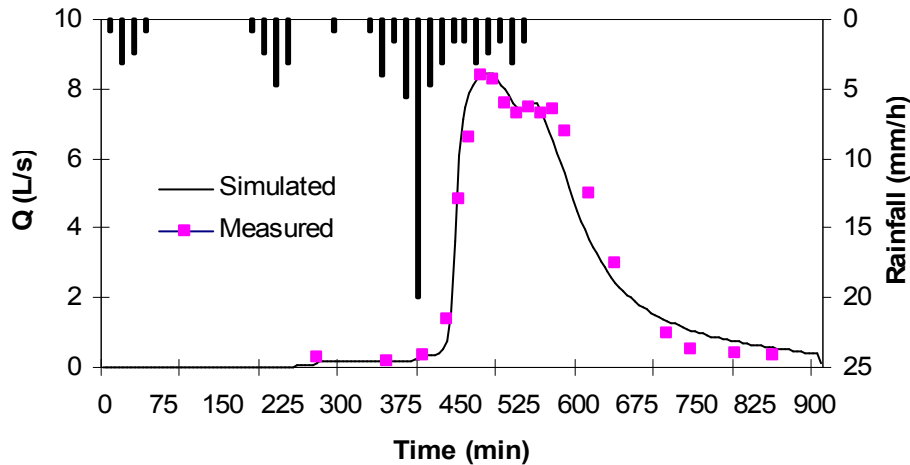
**Figure 34.** Graphical calibration of  $\beta$  involved in Equation (9) from the runoff event of March the 4<sup>th</sup> in 2005.

In a second step, the transfer function was calibrated by tuning the Manning roughness coefficient. This coefficient should be different between irrigation conditions and rainfall ones. Indeed, the water depth is much lower during rainfalls than under furrow irrigation, the lumps in the furrows causing the relative roughness to be much higher in the case of rainfall. Also, the transfer model integrates the runoff on the elementary sub-plot partially covered by the crop as well as the runoff in the furrows. The calibration phase yields a value of  $n = 0.2$  during rainfall for all events. This value of  $n$  is higher than the one usually observed in furrows, which is consistent with the remarks above. Comparable values but in the case of runoff on a plane surface with vegetation were found by Muñoz-Carpena *et al.* (1998), Paige *et al.* (2002), Mailhol and Merot (2008). In fact, surface conditions (roughness of the soil surface, crop height) can cause some variation of the roughness coefficient with time, affecting the transfer dynamics. Such a refinement could be addressed with a large number of rainfall events, but it is not significant in the present study. The sensitivity analysis presented further shows the influence of the Manning roughness parameter on the outflow hydrograph. The quality of the simulation is attested by the high values of the coefficient of efficiency of Nash-Sutcliffe (ASCE, 1993), denoted  $CE$ , obtained after model calibration (Figure 35). A  $CE$  value close to 1 indicates that predicted discharge is close to the measured one.

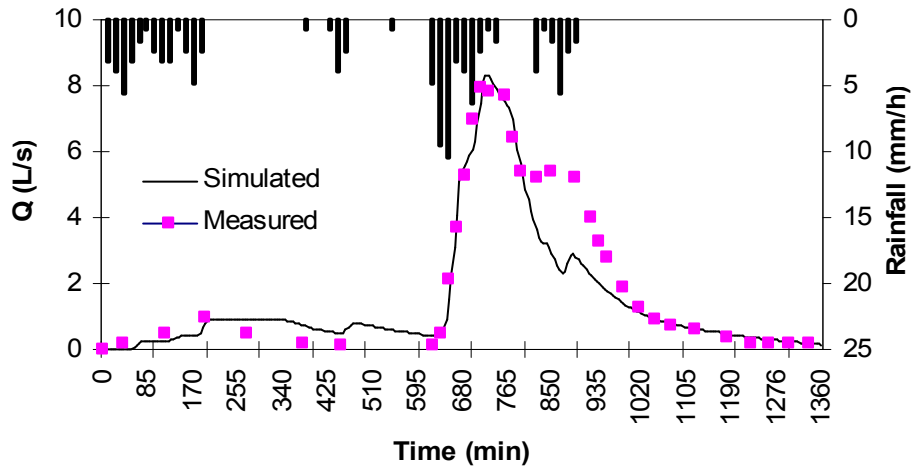
The other events are used for the validation step. For the rainy event of January 2006, the initial soil moisture is close to saturation ( $\theta_i = 0.43$ ) at the beginning of the rain, causing the runoff process. Maximal discharge is well simulated, whereas the depletion phase is partially under-predicted (Figure 36). For November 2004, the initial moisture is lower than

$\theta_s$ , unlike for the event of January 2006, and the rainfall intensity is too weak to initiate a significant runoff, as can be seen in Figure 37. A comparable behaviour is observed for the event of March 2006. At the beginning of the rainfall event, no significant runoff occurs, due to a rather low value of the initial moisture ( $\theta_i = 0.38$ ), compared to that of January 2005 ( $\theta_i = 0.43$ ) and low rainfall intensity conditions. Runoff is generated when the soil moisture reaches  $\theta_i \approx 0.44$  (Figure 38). However, the peak-discharge is largely under-predicted. It seems that the furrows also act as a shallow drain system collecting flows from the superficial soil layer. The contribution of these interflows is all the more significant as the intensity of the rain generating direct runoff is low. This phenomenon is not taken into account in the model.

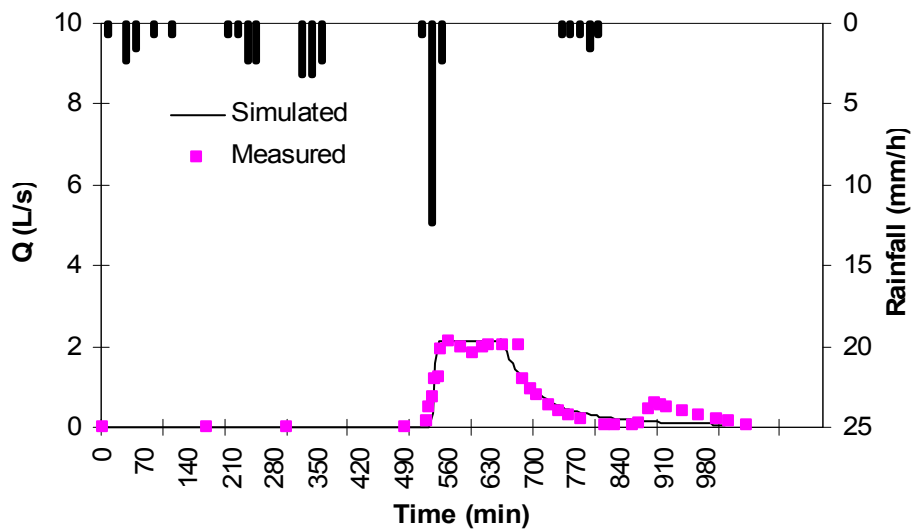
For the event of November 2004, the total rain height is low, but the rain intensity is rather large (15 mm/h) and, in this case, the response of the furrow system is correctly simulated. This example also points out the importance of the rainfall sampling time, which is 15 min. The rainfall distribution is unknown within this time step, and, for instance, the maximum measured value of the rainfall height (2.4 mm) for the event of February 2006 could have fallen in 5 min, resulting in a precipitation rate close to 30 mm/h, which is much larger than  $K_s$ . Despite some discrepancy between the measured and simulated outflows for the events of February and March 2006 (Figure 38 and Figure 39), the runoff volumes are correctly simulated as shown in Figure 40.



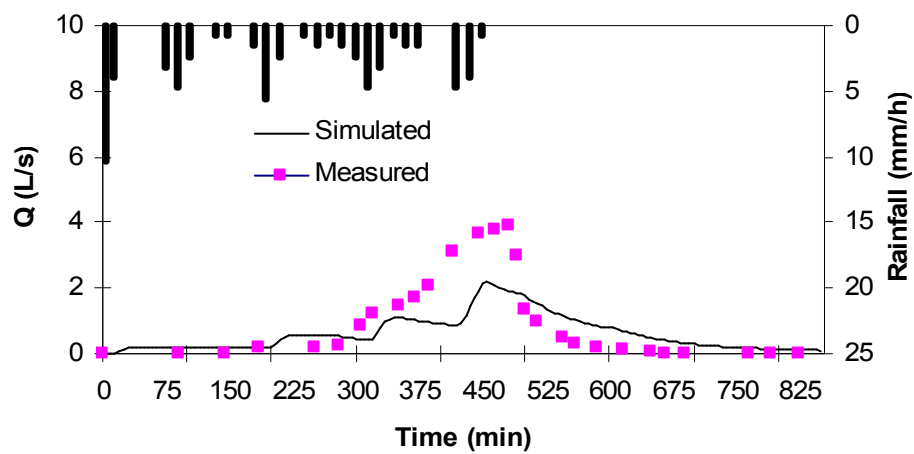
**Figure 35.** Model calibration on the event of March 2005 ( $K_s = 0.2$  cm/h,  $n = 0.2$ ,  $\theta_i = 0.43$  ;  $CE = 0.965$ ). Measured rainfall on a 15 min time step is converted here in mm/h.



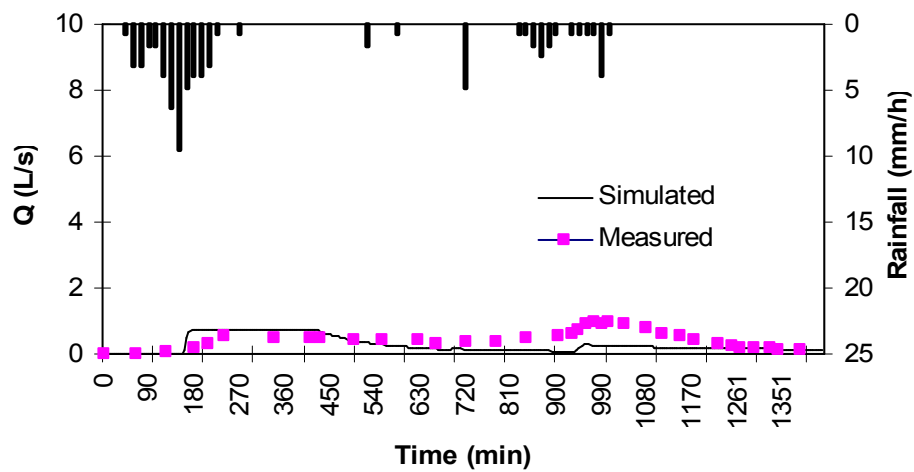
**Figure 36.** Model verification on the event of January 2006: ( $K_s = 0.2$  cm/h ;  $n = 0.2$ ,  $\theta_i = 0.43$  ;  $CE = 0.889$ )



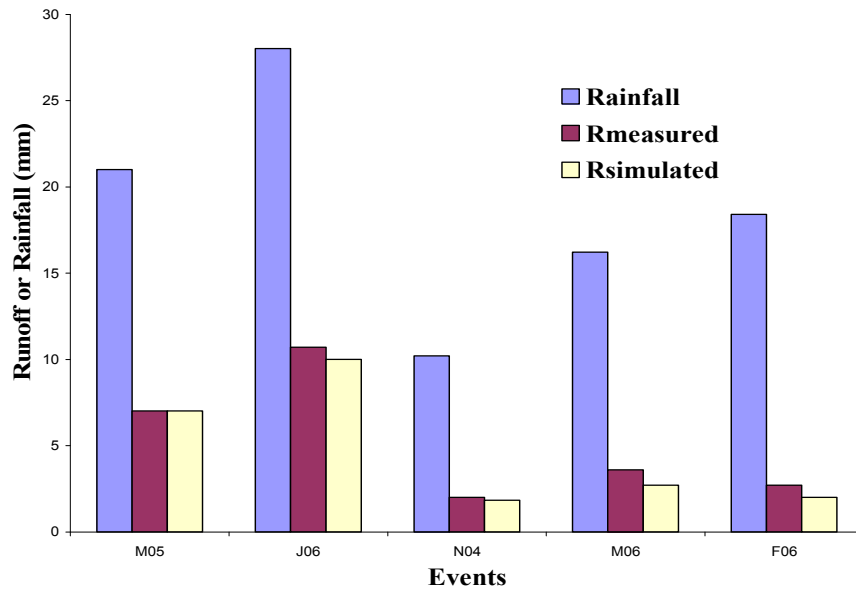
**Figure 37.** Model verification on the event of November 2004 ( $\theta_i = 0.40$ ;  $CE = 0.829$ )



**Figure 38.** Model verification on the event of March 2006 ( $\theta_i = 0.38$  ;  $CE = 0.501$ )



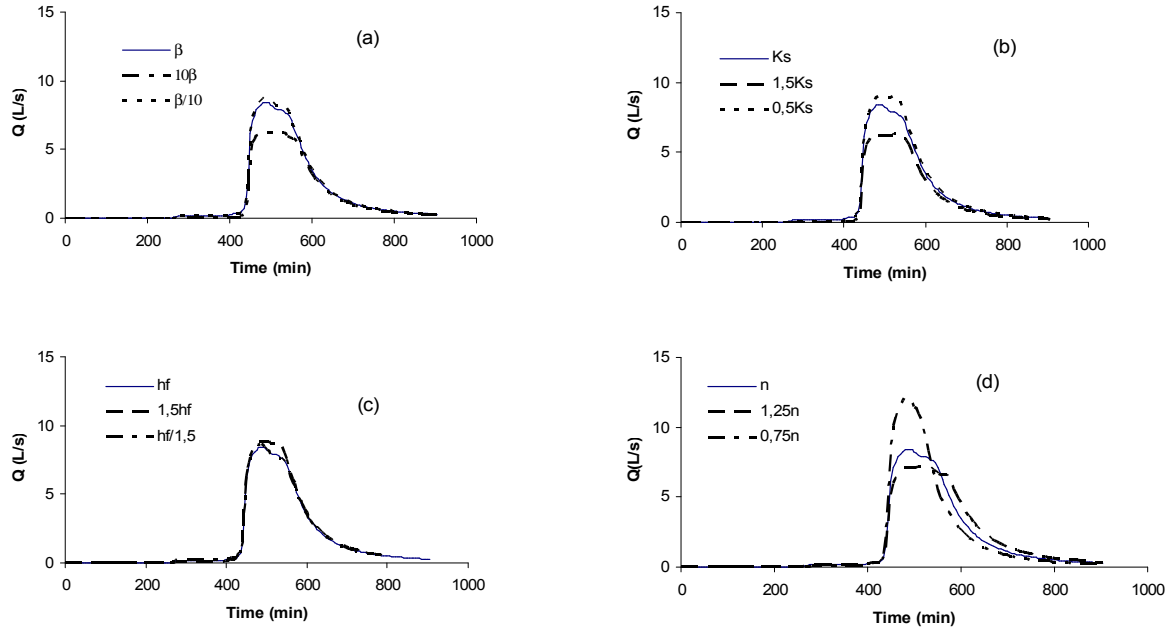
**Figure 39.** Model verification on the event of February 2006 ( $\theta_i = 0.42$  ;  $CE = -1.1$ )



**Figure 40.** Measured and simulated runoff amount for the different rainfall events shown in Figures 35-39

### 4.3. Sensitivity Analysis

A sensibility analysis is conducted on the first event (March 2005) used for model calibration (Figure 41). One can see that  $\beta$  (Figure 41a), parameter governing soil water depletion, is much less sensitive under than above its optimal value. This highlights the role of the soil water depletion model. Peak discharge decreases by 25% when  $\beta$  is multiplied by 10. A comparable variation (Figure 41b) is obtained when  $K_s$  is increased by 50%. Parameter  $|h_f|$  (i.e.  $\lambda_c$ ) appears to be much less sensitive in this case (Figure 41c), since the value  $\theta_i$  is close to saturation at the beginning of the simulation. One can note a strong dissymmetry regarding  $n$ , the roughness coefficient. Increasing  $n$  by 25% results in a peak discharge decreased by 18%, whereas decreasing  $n$  by 25% results in a discharge peak increased by 40% (Figure 41d).



**Figure 41.** Sensitivity analysis of the model parameters on the event of March 2005 (a):  $\beta$  (b) :  $K_s$ , (c):  $h_f$ , (d):  $n$ .

## 5. Application to drainage issues

Water excess during winter is a constraint for the production system in the Gharb Valley irrigation system. The furrow irrigation system may facilitate the evacuation of the excessive water volumes during the winter rainfalls. The efficiency of such a system can be analyzed under typical rainfalls, such as events of one-year return period. These events are characterized by significant rainfall intensities and should be correctly simulated with the present model.

As an illustration, a typical rainfall is generated thanks to the method proposed in the French national flood synthesis in 1981 for an event of a one-year return period. The method uses the coefficients of the Montana formula. The latter gives the rainfall intensity as a function of time ( $q_r = a t^{-b}$ ) for a given return period characterized by specific values of  $a$  and  $b$ . The values  $a = 35$  mm/h and  $b = 0.6$  for a one-year return period were obtained by Hammani (2002) for the Gharb region. A characteristic time  $D$  is defined (the lag-time in the case of a watershed), generally set to the time between the maximum rainfall intensity and the peak discharge of a representative event. For a time  $\tau$  between  $-D$  and  $D$ , the rain intensity is defined as follows:

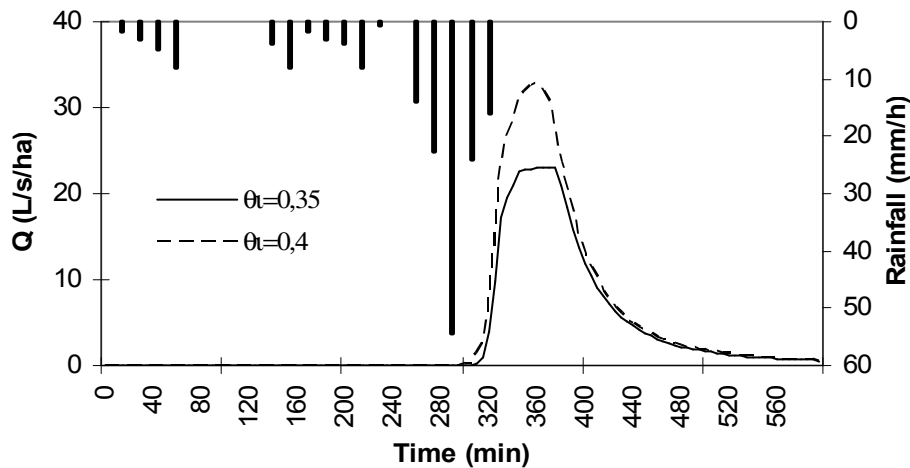
$$q_r(\tau) = \frac{a(1-b)}{14\tau^b} \frac{\left(\frac{\tau}{D}\right)^2 + 20\frac{D}{|\tau|} - 14}{\left[\left(\frac{\tau}{D}\right)^2 + 2\frac{D}{|\tau|} - 2\right]^{\frac{10-3b}{7}}} . \quad \text{Equation 16}$$

The cumulative rainfall between  $-\tau$  and  $+\tau$  is given by:

$$P_1(-\tau, \tau) = a \left[ \frac{\tau}{\left[\left(\frac{\tau}{D}\right)^2 + 2\frac{D}{\tau} + 2\right]^{3/7}} \right]^{1-b} . \quad \text{Equation 17}$$

The value of  $D$  corresponding to the highest observed discharges (March 2005, January 2006) is close to 0.75 h. In order to generate a complex rainfall, the synthetic hyetograph is assumed to be preceded by moderate rainfalls (Figure 42) filling progressively the soil water reserve as for the event of March 2005. Two different initial moisture values were used ( $\theta_i = 0.35$  and  $\theta_i = 0.40$ ). This example shows that, even when the simulation starts with  $\theta_i$  far from saturation, an intense rainy event generate a substantial runoff.

Depending on initial soil conditions, a peak discharge in the range of 22 to 35 L s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> can be reached. In the experimental plot, the evacuation system consists of trapezoidal ditches with a bottom width of 50 cm, a maximal depth of 25 cm, a side slope of 0.5 and a bottom slope of 0.2%. A Manning roughness coefficient of 0.05 leads to a conveyance capacity of 39 L/s. This conveyance capacity allows the one year return simulated event to be evacuated whatever the value of the initial moisture be. However, in the Gharb Valley, the previous ditch characteristics are designed to collect the runoff of plot groups of 6 hectares, and then most ditches have a largely insufficient conveyance capacity. Even if the furrow system is efficient to evacuate water from the plots, this excessive water should be conveyed out of the cropped lands; the present modelling approach can be used to design such an evacuation system.



**Figure 42.** Runoff event generated by a synthetic hyetograph (return period = 1 year) for different initial soil water contents.

## 6. Conclusion

This paper analyzed the behaviour of a furrow system under complex rainfall events. A numerical model was developed, combining the kinematic wave solution for the water transfer through the furrow system and a production function based on the Green-Ampt equation. The model was used to evaluate peak discharge and water amounts that can be evacuated from plots of approximately 1 ha. A calculation procedure was developed to account for complex rainfall events.

The model was calibrated using flow measurements obtained during irrigation events and five rainfall events in 2005 and 2006. The soil parameters obtained during the irrigation events give satisfactory results when applied to the simulation of rainfall events. The parameter used in the flow propagation (the Manning roughness coefficient) within the furrows needs to be calibrated separately under irrigation and rainfall, since the flow characteristics are largely different. In the validation process, the model showed some limitations in the case of small rainfall intensities. These limitations may be addressed by adopting shorter sampling times for the rainfall monitoring, and by representing the interflows which may become significant when rain intensities are low.

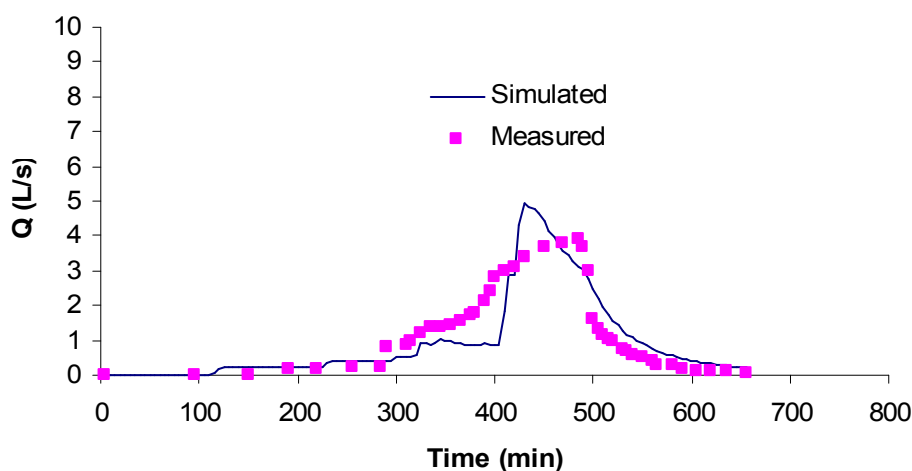
As an application, the model was used to simulate the behaviour of the furrow system under a one-year return period rainfall. The results provide the peak discharge that should be evacuated out of a parcel or a group of parcels, and therefore can be used to design ditches able to drain the excessive volumes of water out of the cropped area during a rainy period.

## Conclusion concernant le modèle de ruissellement

Au terme de ce paragraphe nous rappelons que l'objectif était d'évaluer l'aptitude d'un système de raies à évacuer les eaux des précipitations hivernales qui provoquent des engorgements du sol préjudiciables à la mise en place des peuplements, à la croissance et au développement des cultures. Un modèle numérique a été développé pour prédire l'évaluation du ruissellement selon le processus hortonien dont la pertinence a été montrée expérimentalement. Ce modèle simule la genèse du ruissellement et les hydrogrammes de crue à l'exutoire d'un fossé recueillant les eaux de  $N$  raies d'irrigation d'une parcelle de forme rectangulaire et de raies de pentes uniformes (telle est la configuration préconisée des aménagements gravitaires du périmètre du Gharb). Le modèle couple une fonction de production du ruissellement basée sur l'équation du Green et Ampt et le modèle de l'onde cinématique pour le transfert de l'eau à travers un système de raies. Le principe de modélisation repose sur une discrétisation du vecteur d'évacuation : la raie en plusieurs mailles, dont chacune collecte les apports latéraux d'une bande de terrain soumise à une pluie. Chaque maille produit l'excès d'eau qui ne peut s'infiltrer. Ce modèle prend en compte des épisodes pluviométriques complexes (arrêt et reprises des précipitations). Une loi de ressuyage du sol pour gérer l'humidité initiale du sol sous précipitations intermittentes a été intégrée au modèle.

Le modèle quant à ces paramètres principaux (annexe V) relatifs à l'infiltration a été calé en utilisant les avancements mesurés lors des irrigations de printemps et 5 événements pluvieux enregistrés durant les années 2005 et 2006 ayant générés des épisodes de ruissellement. Les paramètres hydrodynamiques calés sur la base du modèle d'irrigation ( $\lambda_c$  et  $K_s$ ) donnent des résultats satisfaisants lorsqu'ils sont utilisés pour la simulation du ruissellement. Par contre, le paramètre relatif à la rugosité (coefficient de Manning) obtenu à partir de l'irrigation nécessite un calage spécifique sous précipitations. Ce coefficient empirique se trouve dépendant de la nature des écoulements. En irrigation, les débits injectés en tête de raies sont relativement importants et les écoulements s'opèrent principalement au niveau des raies. Par contre en ruissellement, les eaux sont recueillies au niveau de l'impluvium de la raie et acheminées vers celle-ci. La présence de la végétation, le stade de développement de la culture et le passage des engins des travaux du sol et d'entretien des cultures ont aussi des répercussions sur les écoulements générés au niveau des raies. Nous pensons aussi, que le tirant d'eau dans la raie est toujours plus important en irrigation qu'en ruissellement sous précipitations, ce qui affecterait le coefficient de rugosité.

Par ailleurs, le modèle a tendance à sous estimer le ruissellement lors des épisodes pluvieux de faibles intensités ce qui peut être expliqué soit par le pas de temps relativement important (15 mn) adopté pour l'enregistrement des précipitations où la participation de l'écoulement hypodermique au ruissellement et qui n'est pas prise en compte dans le modèle. En effet, le pas de temps retenu de 15 mn pourrait paraître trop long. Une infinité de répartitions temporelles en terme de hauteur de précipitations peuvent avoir lieu à l'intérieur de ce même quart d'heure. Un exemple de distribution temporelle (il peut y en avoir une infinité) est proposé à la Figure 43. On constate que sur un événement comme celui de mars 2006, on peut générer des débits maximaux très significativement différents.



**Figure 43.** Adoption d'un pas de temps de 5 mn et simulation événement March 2006 ( $\theta_i = 0.38$  ;  $CE = 0.65$ )

Quant à l'écoulement hypodermique, il est reconnu que les raies jouent également le rôle d'un fossé drainant les billons. Cet écoulement hypodermique négligeable lors d'événements intense l'est beaucoup moins lors d'événements générés par de faibles intensités de pluies.

Par ailleurs le modèle reste très sensible à l'écartement des raies. Dans l'approche de modélisation mécaniste adoptée dans le modèle, le temps de transfert de l'eau de l'impluvium vers les raies est négligé. De ce fait, tant que les écartements des raies sont réduits l'hypothèse est vérifiée dans le cas où les écartements augmentent le temps de transfert de l'impluvium vers les raies ne peut être négligé Et delà, il faut adopter une autre approche de modélisation conceptuelle plus globale pour le transfert de l'eau vers les raies.

Le modèle de par sa conception est très sensible à l'écartement des raies. Dans la modélisation adoptée, le temps de transfert de l'eau de l'impluvium vers les raies est négligé. En conséquence, le modèle garde sa crédibilité tant que l'espacement des raies est de l'ordre de grandeur de celui pour lequel le modèle a été calé et validé. Au-delà, il convient d'adopter une autre approche de modélisation très certainement de type 2D, une part des écoulements s'effectuant sur l'impluvium lui-même et dans le sens de la pente. Il est du reste fort probable que la valeur de la rugosité  $n$ , paramètre phare du transfert, varie avec l'espacement des raies

Le modèle a été utilisé pour simuler le comportement des raies sous une précipitation d'une période de retour d'une année. Cette approche peut être utilisée pour le dimensionnement des fossés d'assainissement dans le périmètre du Gharb. La superficie qui reste à aménager en grande hydraulique dans le Gharb est de l'ordre de 110 000ha. Le débit à l'exutoire de la parcelle agricole nivelée avec raies résultant de la simulation est très important et ne peut être évacué par le réseau de colatures telles qu'elles sont dimensionnées actuellement dans le périmètre du Gharb (cf. chapitre précédent II). Aussi, les eaux recueillies au niveau des parcelles sont acheminées à travers un réseau de fossés d'assainissement vers l'exutoire (Oued Sebou où autre). A cet effet, l'attention est attirée sur le fait, que le réseau d'assainissement recueillant les eaux à l'exutoire des parcelles agricoles doit être entretenu régulièrement pour pouvoir jouer pleinement le rôle pour lequel il a été conçu.

## **B. Modélisation de l'irrigation**

L'analyse des systèmes d'irrigation à la raie à la parcelle repose généralement sur les données recueillies sur un nombre limité de raies (Elliot and Walker, 1982 ; Renault and Wallender, 1992 ; Shepard *et al.* 1993). Cette analyse est utilisée pour déterminer le couple débit d'alimentation et le moment d'arrêt des arrosages qui améliorera l'efficacité et l'uniformité d'arrosage. Cette analyse suppose que les propriétés d'infiltrations sont constantes tout au long de la campagne agricole bien que des expérimentations en plein champs ont montré le contraire (Berthomé, 1991 ; Childs *et al.*, 1993 ; Mailhol *et al.*, 1999 ; Mailhol, 2003). En plus de la variabilité de l'infiltration, la section en travers et la rugosité sont des variables inhérentes au système de raies. Tous ces facteurs induisent une variabilité de l'avancement entre les raies et une distribution non uniforme de l'eau sur la parcelle.

Certaines études ont examiné l'impact de la variabilité spatiale de l'infiltration à l'échelle de la raie (Bautista and Wallender 1985 ; Wallender 1986 ; Bautista and Wallender 1992). Lamacq et Wallender (1994) ont évalué l'impact de la flexibilité de l'alimentation en eau d'irrigation sur les performances de l'irrigation à la raie. Le modèle de simulation FHYDDT (Bautista and Wallender 1992) a été utilisé pour calculer la dose appliquée le long de la raie. La dose calculée est utilisée comme input pour le modèle du bilan hydrique (SWSSM) qui actualise l'humidité du sol comme une fonction de l'évapotranspiration potentielle. Le modèle FHYDDT (modèle de simulation à l'irrigation à la raie) utilise l'équation d'infiltration de Kostiakov modifiée. Pour prendre en compte la variation des caractéristiques d'infiltration tout au long de la saison, un jeu de paramètres de l'équation de Kostiakov modifiée a été utilisé pour la pré irrigation et un second jeu de paramètres a été utilisée pour le reste de la saison. Les simulations ont été conduites à l'échelle d'une seule raie mais la distribution de l'eau obtenue est supposée l'être à l'échelle de la parcelle. Ainsi, l'étude ne prend pas en compte les différences d'avancement entre raies, ce qui est communément observés à l'échelle de la parcelle. Ces variations peuvent avoir des impacts important sur l'uniformité de distribution de l'eau à l'échelle de la parcelle et sur le rendement de la culture.

La nécessité de prendre en considération la non uniformité latérale du processus d'avancement à l'échelle de la parcelle a été mise en évidence par Popova et Kuncheva (1996) lors de leur analyse de la performance de l'irrigation à l'échelle d'un jeu de N raies en utilisant leurs approche de modélisation FURMOD. Néanmoins, et compte tenu du caractère empirique des paramètres utilisés dans le modèle, celui-ci a pu seulement être utilisé pour évaluer les performances de l'irrigation des événements pour lesquelles les paramètres du modèles ont été calibrés.

Ces travaux montrent que l'approche de modélisation est pertinente quand on analyse l'impact de la pratique de l'irrigation à l'échelle de la parcelle et de la saison. SOFIP (Mailhol *et al.*, 2005) est une approche de modélisation opérationnelle qui aide à identifier les pratiques d'irrigation susceptible d'atténuer les risques de percolation profonde (DP) pour un contexte donnée de sources de variabilités tout en assurant un niveau de rendement acceptable pour l'agriculteur. Ce modèle sera utilisé pour la simulation de l'irrigation à la raie à l'échelle de la parcelle et de la campagne agricole ainsi que pour l'évaluation du rendement.

## Présentation du modèle SOFIP (Simulatin Of Furrows Irrigation Practices)

Le modèle SOFIP, permet l'analyse des pratiques d'irrigation à la raie et prend en compte la variabilité spatiale et temporelle du processus avancement-infiltration. Il peut être utilisé pour comparer des stratégies de gestion de l'irrigation à la raie.

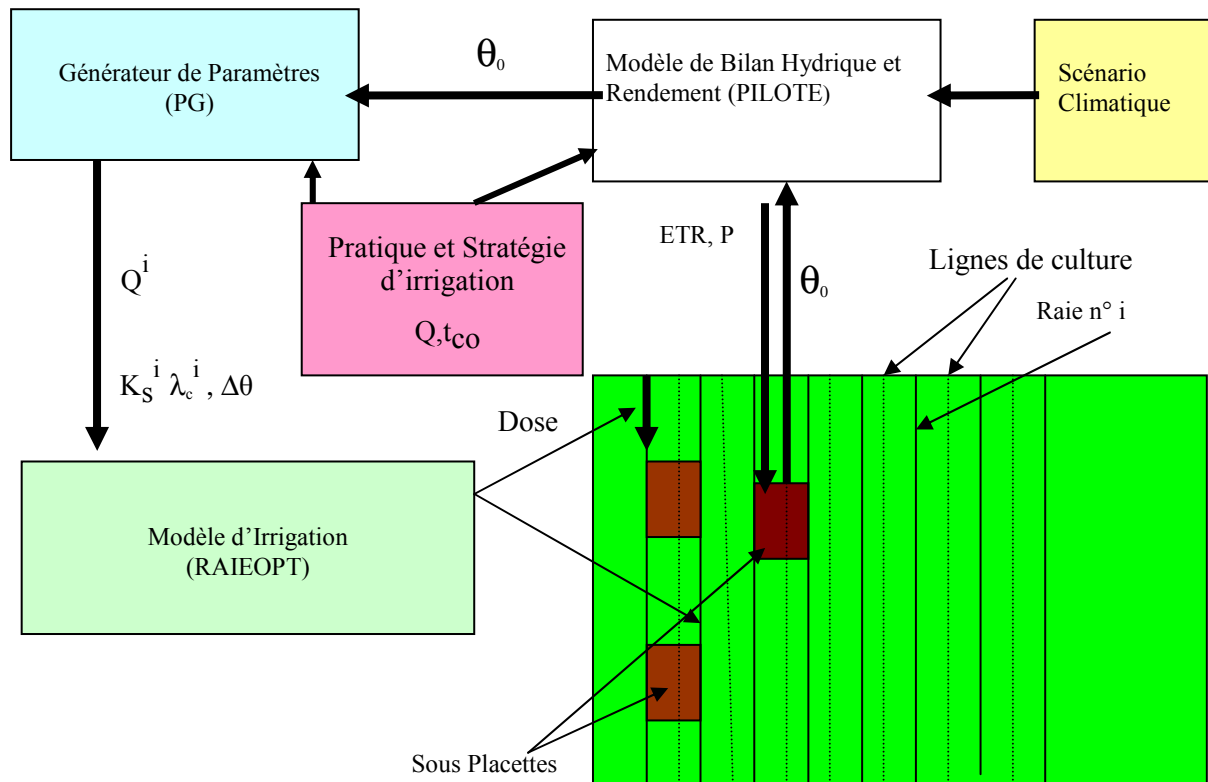
Le modèle se compose de 3 éléments distincts (Figure 44). Le premier élément est RAIEOPT, un modèle hydraulique qui prédit l'avancement infiltration. L'infiltration prédite fournie par RAIEOPT est basée sur un paramètre de déficit d'humidité du sol. Ce paramètre peut être mis à jour avant chaque événement d'irrigation par le modèle PILOTE qui simule le bilan hydrique du sol. PILOTE est connecté au générateur de paramètre (PG) qui est le troisième élément du modèle. Il fournit les données nécessaires à RAIEOPT pour simuler l'irrigation à l'échelle d'un ensemble de raies. Les résultats des études de terrain basés sur l'analyse des sources de variabilité et de leur impact sur le processus de l'avancement sont à l'origine de ce générateur de paramètres qui intègre la nature stochastique des sources de variabilité. Le fait que le système de distribution ne peut pas délivrer le même débit à chaque raie constitue également une source de variabilité.

La première hypothèse de base de SOFIP est que les principales sources de variabilité sont de nature stochastique. La deuxième hypothèse est propre à RAIEOPT et indique que le processus de l'avancement à l'échelle de la raie est principalement régi par les caractéristiques de l'infiltration. Les paramètres statistiques de l'infiltration peuvent être obtenus par calage (en utilisant l'approche inverse de RAIEOPT) sur l'avancement lors d'un arrosage. Mais, l'identification de meilleures pratiques d'irrigation exige une approche de modélisation prédictive étant donné que le jeu de paramètres gouvernant le processus d'infiltration est tributaire de la stratégie d'irrigation adoptée. En effet, selon la date d'irrigation résultant de la stratégie adoptée, le sol peut être plus ou moins humide et ce qui impacte l'infiltration du sol. Le caractère prédictif de RAIEOPT vis-à-vis de la simulation du processus avancement-infiltration à l'échelle de la raie a été démontré par Mailhol (2003). Dans SOFIP, cette prédiction à l'échelle de l'ensemble des N raies est rendue possible en utilisant le générateur de paramètres (PG). Une des originalités de ce générateur stochastique est de prendre en compte l'existence d'une auto-corrélation du processus d'avancement entre raies. Quant au caractère conditionnel liant le tirage aléatoire (méthode Monte Carlo) du paramètre  $\lambda_c$  au paramètre  $K_s$  il peut être modulé au moyen du coefficient de corrélation  $r$  liant ces deux paramètres. Pour plus de détail concernant PG, nous invitons le lecteur à consulter l'annexe IV. Ainsi, la dose appliquée (WAD) le long de chacune des N raie d'une parcelle peut être calculée selon les pratiques d'irrigation à la raie adoptées par exemple raies ouvertes (Mailhol

et Gonzalez, 1993), ou raies bouchées (Mailhol *et al.*, 1997a). Lors du traitement de la fourniture en eau à l'échelle de la parcelle, WAD, dans ce cas, est attribuée à une sous placette ayant une longueur  $l_x$  ( $l_x = 5$  m) et une largeur  $l_y$  correspondant à l'espacement entre raie (FS) et situé sur la ligne de culture. La WAD affectée à la sous placette est obtenue par la moyenne de deux WAD de raies adjacentes en tenant compte de sa localisation.

Le modèle de culture tel qu'il a été mis au point estime le bilan hydrique du sol à un pas de temps journalier et prédit le rendement des cultures et les pertes par drainage pour l'ensemble des placettes pour des parcelles qui ne sont pas sujettes aux excès d'eau. Il utilise comme entrées les données climatiques provenant de la station agro-météorologique la plus proche et la WAD assignée à chaque placette. Avant chaque irrigation, le modèle de culture donne, via le PG, les conditions initiales requises aux paramètres d'infiltrations du modèle de l'irrigation à la raie.

La gestion de l'eau à la parcelle fait partie des stratégies d'irrigation de l'agriculteur. Par exemple, dans les sols argileux limoneux du Sud Est de la France, la fréquence des irrigations choisie par l'agriculteur est d'irriguer tous les 15 jours par exemple. Par contre, dans d'autres pays, ce genre de décision peut être modifié suite à des événements pluvieux, entraînant le report de l'irrigation dont la durée dépend de la hauteur des précipitations recueillies. Dans le contexte d'un libre accès à la ressource en eau d'irrigation, la décision d'irriguer après l'épuisement d'un niveau de la réserve en eau sol, peut augmenter le rendement et améliorer l'efficacité d'irrigation. Les différentes composantes de cette approche de modélisation seront présentées ci-dessous :



**Figure 44.** Représentation schématique du modèle SOFIP

Source : Maillhol *et al.*, 2005

### Le modèle d'irrigation à la raie : RAIEOPT

L'approche analytique simplifiée proposée dans le modèle RAIEOPT est basée sur la solution de la conservation de la masse (Lewis and Milne 1938) pour l'avancement  $x(t)$

$$Qt = \sigma A_0 x(t) + \int_0^x I(t-ts) ds$$

**Equation 18**

où  $Qt$  = volume d'eau entrant ;  $\sigma A_0 x(t)$  = volume d'eau stocké au niveau de la raie à l'instant

$t$  ;  $\int_0^x I(t-ts) ds$  = volume d'eau infiltrée.  $A_0$  = section mouillée en tête de raie ( $m^2$ ) multiplié par un coefficient unitaire ( $1,000 \text{ L}/m^3$ ) ;  $\sigma$  = facteur de forme (généralement estimé à 0.75-0.80) ;  $t$  = time (min) ;  $ts$  = temps (min) ;  $x(t)$  = position du front d'avancement à l'instant  $t$  ;  $Q$  = débit injecté dans la raie ( $L/min$ ) ; et  $I$  = infiltration cumulée ( $L/min$ ). Equation 1 a été largement utilisée en modélisation de l'irrigation de surface. La solution à cette équation en utilisant la méthode de la transformée de Laplace pour l'abscisse  $x(t)$  est proposée par Phillip and Farrell (1964). La solution exacte de l'équation 18 pour la loi d'Horton :

$$i(t) = B \{1 - \exp(-\ell t)\} + Cst$$

**Equation 19**

(où  $B$  est exprimée en L/m,  $\ell$  en min<sup>-1</sup> et  $C_s$  taux d'infiltration de base en L/m/min) est donnée par :

$$x(t) = A_1(1 - e^{\alpha_1 t}) + B_1(1 - e^{\alpha_2 t}) \quad \text{Equation 20}$$

où  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  sont liés à  $Q$ ,  $\phi A_0$  et les paramètres d'infiltration de l'équation 19.

Pour  $S_0$ , une pente donnée du terrain, la section mouillée  $A_0$  est estimée en résolvant l'équation de Manning Strickler en supposant une raie de section trapézoïdale et une largeur de radier de 10 cm et un fruit de berge de  $\frac{1}{2}$  (paramètres de forme de section en travers généralement observée en France). Le coefficient de Manning est fixé à 0.05 pour la première irrigation et à 0.04 pour les autres irrigations. Ensuite,  $B$ ,  $\rho$  et  $C_s$  sont les seuls paramètres estimés par calibration à partir de l'avancement selon la méthode expliquée dans Mailhol *et al.*, (1997 a) et Mailhol (2003). Cette méthode de calibration, appelée aussi approche inverse, permet au modèle d'être utilisé en temps réel pour améliorer l'efficacité d'irrigation quand l'avancement est mesuré sur des raies représentatives. Dans Mailhol (2003) une version prédictive du modèle est proposée au moyen de l'équation suivante :

$$I(t) = 0.9 \lambda_c \Delta \theta [1 - \exp(\kappa K_s (\lambda_c \Delta \theta)^{-1} t)] + K_s \tau \quad \text{Equation 21}$$

Cette approche prédictive nécessite la valeur de  $\lambda_c$  (la longueur capillaire en cm),  $\Delta \theta = \theta_s - \theta_0$  ( $\theta_s$  teneur en eau à saturation ;  $\theta_0$  teneur en eau initiale) et  $K_s$  (conductivité à saturation en cm/h).  $\lambda_c$  est une caractéristique macroscopique du sol représentant la hauteur moyenne de la frange capillaire. Selon Reynolds and Elrick (1985) et White and Sully (1987) pour un sol structuré  $\lambda_c$  varie de 3cm pour un sol sableux à 25 cm pour un sol argileux limoneux et peut atteindre des valeurs plus élevées pour un sol argileux lourd fissuré (le cas des sols du Gharb en période estivale). Le facteur empirique  $\kappa$  est fixé à des valeurs supérieures ou égales à 40 pour des sols lourds fissurés et proche de 10 pour des sols sans ou faibles fissurations. Ces paramètres nous permettent de réduire ou d'augmenter l'effet de la macroporosité sur l'infiltration, ce qui donne plus de souplesse au modèle. Les paramètres  $\lambda_c$  et  $K_c$  peuvent être déduits de l'avancement à l'échelle de la raie pour  $\Delta \theta$  mesuré et supposé représentatif de la raie considérée dont les mesures in situ sont disponibles.

Pour prendre en compte l'effet du périmètre mouillé sur le taux d'infiltration [comme pour  $C_s$  dans Mailhol and Gonzalez (1993) et dans Mailhol *et al.* (1997a)], la valeur de  $K_s$  obtenue pour un débit donné ( $Q_{sd}$ ) est modifiée ( $K_{sQsd} \rightarrow K_{sQnv}$ ) pour simuler le processus de l'avancement en utilisant une autre valeur de débit. Ce dernier donne  $Wp_{Qnv}$ , la valeur du périmètre mouillé basée sur facteur de correction comme fonction du ration du périmètre mouillé.

$$K_{Snw} = K_{SSsd} \left[ \frac{Wp_{Qnv}}{Wp_{Qsd}} \right]^{0.6} \quad \text{Equation 22}$$

Cette correction est aussi proposée par certains auteurs comme Oyonarte et *al.* (2002) et Alvarez (2003). Dans la version prédictive du modèle, la valeur de  $K_s$  proposée dans le fichier de données est supposée être attribuée au débit stand d'alimentation  $Q_{sd} = 1$  L/s.

Pour un type de sol donné, les paramètres du modèle peuvent être tirés soit de la littérature ou des fonctions pédo-transfert (Verreken *et al.* 1990 ; Schaap and Leij 1998). En règle générale, ces valeurs de références correspondent à celles d'un sol structuré. Elles permettent la prédiction du processus avancement -infiltration quand la teneur en eau initiale du sol  $\theta_0$  est fixée. Néanmoins, ils ne sont pas pertinents pour le traitement de la première irrigation. En effet, après le labour ou la réalisation des raies, la structure du sol est moins compacte et le jeu de paramètres doit être réajusté pour les conditions adaptées à la première irrigation. Les fonctions pédo-transfert utilisant la densité apparente peuvent être proposées pour l'actualisation des paramètres d'infiltration (Berthomé 1991 ; Mailhol *et al.*, 2001 ; Mailhol 2003). Il faut reconnaître la difficulté de prédire avec précision les changements des paramètres hydrodynamique après l'opération du labour (Or, 1996). RAIEOPT a été appliqué sur différents types de sol et de conditions d'arrosages: sol limoneux (Mailhol, 2003), sol argileux limoneux (Mailhol *et al.*, 1999). De ces applications deux constats ont pu être établis. Premièrement, les valeurs de  $K_s$  et  $\lambda_c$  obtenues après la première irrigation sont constantes tout le long de la saison d'irrigation. Deuxièmement, ces valeurs doivent être environ multipliées par 2 pour simuler le processus moyen d'avancement relatif à la première irrigation. Mais, quand des expérimentations sur l'irrigation à la raie ont été conduites dans un contexte représentatif du sol d'une région donnée, il est bien sur recommandé de caler le modèle sur les données d'avancement disponibles au lieu d'utiliser les facteurs empiriques précédemment proposés. Deux jeux pour  $\lambda_c$  et  $K_s$  qui peuvent être soit extraits de la littérature ou issus des expérimentations, sont proposés dans SOFIP pour simuler le processus de l'avancement tout au long de la saison d'irrigation (le premier jeu pour la première irrigation, et le second pour les autres irrigations).

Le temps d'opportunité (temps d'infiltration à une abscisse donnée),  $\tau = t_{co} - t_a(x) + t_r(x)$  où  $t_{co}$  est le moment d'arrêt de l'alimentation en eau,  $t_a(x)$  le temps d'avancement du front d'eau à l'abscisse  $x$ ,  $t_r(x)$  le temps de récession à l'abscisse  $x$ , permettent de calculer la hauteur d'eau appliquée  $WAD = I(t)$  à une abscisse donnée de la raie.. Le temps d'avancement est

calculé par l'inverse de l'équation du front d'avancement  $x(t)$ , et la formule de recésion (Mailhol and Gonzalez 1993) :

$$t_r(x) = \left[ \frac{x}{60\sqrt{S_0 C_s^{2/3}}} \right]^{3/5} \quad \text{Equation 23}$$

est utilisée pour calculer  $tr(x)$  dans le cas de la pratique de l'irrigation par raies ouvertes.

### **Le modèle de culture : PILOTE (Version standard)**

Le modèle PILOTE permet de simuler le bilan hydrique et le rendement. Il a été développé initialement pour le cas du sorgho et du tournesol (Mailhol *et al.*, 1997) puis étendu au cas d'autres cultures comme le blé (Mailhol *et al.*, 2004) ou le maïs en système conventionnel ou semis direct (Khaledian *et al.*, 2008). Il s'agit d'un modèle à la fois robuste et opérationnel, c'est-à-dire peu exigeant en paramètres à la fois fonctionnels et climatiques. A ce titre les grandeurs climatiques journalières requises sont les suivantes : Pluie, ETo (évapotranspiration de référence, Allen *et al.*, 1998), Rayonnement global, et température moyenne. Au niveau du sol il requiert la teneur en eau à la capacité au champ ( $\theta_{fc}$ ) ainsi que la teneur en eau au point de flétrissement ( $\theta_{pf}$ ). Lorsque l'on fait tourner le modèle sur un cycle de culture il convient de connaître le stock initial en eau sur la profondeur racinaire maximale ( $P_x$ ) au premier jour de la simulation.

Au niveau de la plante, un certain nombre de paramètres sont accessibles dans la littérature comme la température de base, la somme des températures d'émergence et celles relatives aux différents stades, le LAImax, RUE, le taux de matière sèche produite par unité de rayonnement, l'indice de récolte potentiel (de l'ordre de 0.5 pour la plupart des grandes cultures telles que les céréales, les cultures sucrières), le Kcmax. D'autre peuvent à la rigueur faire l'objet de réajustement aux conditions locales comme  $K_r = RFU/RU$  (la plupart du temps fixé à 0.55 dans le cas de PILOTE). Les paramètres devant faire l'objet d'un calage sont ceux déterminant l'évolution (coefficients de forme) du LAI. La valeur 1.25 identifiée sur le cas du sorgho et du tournesol (Mailhol *et al.*, 1997) pour le coefficient d'aversion au stress  $\lambda$  s'avère être générique pour les grandes cultures. Enfin il peut s'avérer nécessaire de caler la relation qui permet d'évaluer l'indice de récolte réel.

Lorsque l'on dispose des paramètres plante, la mise en œuvre du modèle est extrêmement simple et rapide. Le modèle outre le pilotage en temps réel des arrosages, permet de tester des stratégies d'irrigation tels qu'arrosages à dates fixes ou par rapport à un niveau d'épuisement de la réserve totale (ou mobilisable) du sol sur des séries climatiques.

## Les principes du Modèle PILOTE

### Le module sol

Le module sol régit les transferts d'eau au pas de temps journalier (j) au moyen de 3 réservoirs (Figure 45). Le paramètre fondamental de ce modèle est la réserve utile RU exprimée en mm/m. On définit la réserve utile comme la différence entre le stock en eau du sol à la capacité au champ (état du sol après arrêt du drainage) et le stock en eau au point de flétrissement permanent. Le point de flétrissement permanent correspond au stade à partir duquel l'eau n'est plus extractible par la plante. Il est fréquemment assimilé à la teneur en eau à pF 4.2: ( $pF = \log_{10}|h|$ ).

Un réservoir superficiel (R1) à profondeur fixe  $P_s$  ( $P_s = 0.1$  m) gère l'évapotranspiration après un apport d'eau. Il a une capacité maximale  $R1_{max} = RU \cdot P_s$ . Le réservoir superficiel alimente par drainage (d1) le réservoir sous-jacent R2

$$d1(j) = \text{Max}\{0 ; R1(j) - R1_{max}\} \quad \text{Equation 24}$$

, évolutif avec l'enracinement dont la profondeur est simulé selon l'expression:

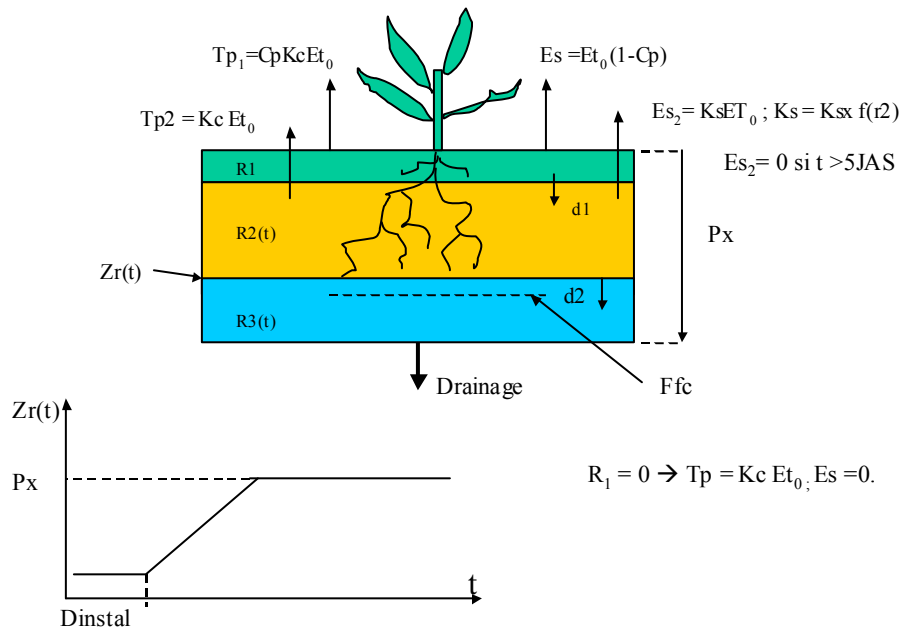
$$Pr(j) = Pr(j-1) + V_r \quad \text{Equation 25}$$

, où  $V_r$  est la croissance racinaire en m/jour. Dans un certain nombre des modèles la croissance racinaire est rattachée à la thermique. Dans PILOTE l'accroissement racinaire du jour considéré est calculé sur la base du minimum entre l'accroissement thermique et l'accroissement imposé (en m/j). En système conventionnel le modèle fait en sorte que l'atteinte de la profondeur maximale coïncide avec celle du développement foliaire maximal, la plante à ce stade mobilisant l'énergie disponible à développer de la matière sèche aérienne. Cependant, compte tenu du fait que les conditions de sol (degré de compaction) agissent également sur la progression racinaire il apparaît souhaitable dans certains cas de privilégier l'option permettant de favoriser  $V_r$  en m/J (cas de sols très compactés, densité apparente très élevée).

L'enracinement peut atteindre la profondeur maximale  $P_x$ . Le paramètre  $P_x$  est une caractéristique propre de la culture dans l'hypothèse où le contexte de sol n'impose pas de limitation physique à l'enracinement (ex: enrochement, nappe, couche très compactée etc.). La croissance racinaire est de type linéaire au delà d'une période de mise en place du système racinaire fixée sur la base d'un cumul thermique. Durant cette période de mise en place, les

racines exploitent une profondeur de sol maximale de 0.3 m. Au delà de cette période, l'enracinement évolue de façon plus ou moins linéaire (en fonction de l'option choisie) de 0.3 m à  $P_x$  (ou  $< P_x$  selon les conditions thermiques).

La progression de l'enracinement peut être stoppée lorsque la teneur en eau du réservoir racinaire passe en dessous d'un certain seuil exprimé en % de la RU. Lorsque les conditions de teneur en eau le permettent, l'enracinement peut se poursuivre à condition de n'avoir pas atteint le début de la sénescence. Ce paramètre seuil n'est pas facile à caler sous nos conditions climatiques. Une valeur de 20% de la RU peut être proposée sur la base de simulations effectuées sur le cas du blé dur en Tunisie (Mailhol *et al*, 2004) où il est assez fréquent que les pluies de la saison  $i$  n'assurent pas la recharge en profondeur du profil asséché durant la saison  $i-1$ .



**Figure 45.** Schéma de fonctionnement du module sol de PILOTE dans sa version classique

Source : Mailhol, 2005

La plante et l'évaporation du sol sollicitent d'abord le premier réservoir qui évolue selon :

$$R_1(t) = R_1(t-1) + P(t) + Irrig(t) - T_{p1}(t) - E_s(t) - d_1(t) \quad \text{Equation 26}$$

où  $T_{p1}$  la transpiration est déterminée à partir de la relation  $T_{p1} = C_p ETM$  avec, l'évapotranspiration maximale :  $ETM = K_c E t_0$ ,  $K_c$  étant le coefficient cultural. On considère

que dans cette couche superficielle, la plante en concurrence avec l'évaporation du sol, peut y prélever sans restriction jusqu'à épuisement de la réserve utile. Le coefficient  $C_p$  de partage est fonction du LAI selon :  $C_p = 1 - \exp(-0.7LAI)$ , l'évaporation du sol  $E_s$  devenant alors égale à  $(1 - C_p)ET_0$ . Le coefficient cultural  $K_c$  est calculé à partir du LAI selon  $K_c = K_{cmax}[1 - \exp(-LAI)]$ , où  $K_{cmax}$  est le coefficient cultural maximal du couvert végétal considéré. Sa valeur peut être accessible dans le bulletin FAO (24) mais peut être modifiée selon les conditions locales (effets d'advection plus ou moins prononcés).

A chaque pas de temps,  $R_2$  alimenté par le drainage  $d_1$  du réservoir  $R_1$  ( $d_1 = \max\{0, (PsRU - R_1)\}$ ), s'accroît de la valeur  $\Theta V_r$  où  $V_r$  est la vitesse de progression racinaire (m/j) et  $\Theta$  la teneur eau de la couche sous le front racinaire, c'est-à-dire l'humidité volumique moyenne exprimée en mm/m du réservoir  $R_3$ . Le bilan hydrique relatif à ce réservoir s'exprime par la relation :

$$R_2(t) = R_2(t-1) + \Theta V_r - \text{Reste}(t) + d_1(t) - d_2(t) \quad \text{Equation 27}$$

Le terme Reste est le complément à prélever (dans  $R_2$ ) sur le pas de temps considéré pour satisfaire ETM. Lorsque  $R_1$  est vide ( $\theta = \theta_{pf}$ ) la plante puise uniquement dans  $R_2$  selon  $Tp_2 = K_c ET_0$ . Quant au bilan du réservoir  $R_3$  (durant la phase de croissance racinaire) il s'exprime selon :

$$R_3(t) = R_3(t-1) - \Theta V_r + d_2(t) - D(t) \quad \text{Equation 28}$$

Le drainage  $D$  définitivement perdu est quand à lui calculé selon :

$$D = \text{Max}\{0 ; R_{3max} - R_3\} \quad \text{Equation 29}$$

où  $R_{3max} = RU [P_x - P_r(j)]$ . On suppose que l'ETR égale l'ETM (évapotranspiration maximale) tant que le premier réservoir  $R_1$  contient de l'eau ou/et que la RFU du réservoir  $R_2$  n'est pas épuisée. Le calcul de l'ETR est fondé sur la réduction linéaire de l'ETM en fonction de la teneur en eau de  $R_2$ . La réduction prend effet lorsque cette teneur en eau de  $R_2$  passe en

dessous de la valeur seuil  $R_s(t) = (1 - K_{ru}).P_r(j).R_u$ . Le prélèvement dans le deuxième réservoir s'exprime alors selon :

$$ETR_2 = Tp_2 = TpKcET_0 \min [1., R_2(t)/R_s(t)] \quad \text{Equation 30}$$

,où  $K_{ru}$  le paramètre de Doorenbos et Kassam (1979) égal au rapport  $RFU/RU$ .

La profondeur  $P_s = 10$  cm a permis, dans différents cas de figures répondant aux conditions précédemment décrites, de simuler de façon satisfaisante la durée de confort hydrique. L'observation de cette durée de confort hydrique précédemment évoquée est basée sur la mesure de la température de surface  $T_s$  au moyen du thermomètre infra-rouge dans des conditions d'indice foliaire (LAI) supérieur à  $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Des mesures d'humidité effectuées par la méthode TDR dans la couche superficielle montrent que la teneur en eau de cette couche chute à une valeur critique au bout de 6 jours après apport. On constate le bon accord des différents indicateurs de stress hydrique, méthode aérodynamique, **SDD**, avec la réponse du modèle PILOTE 1.2 (Mailhol *et al.*, 1996).

L'évaporation du sol est modélisée selon une approche très simplifiée. Elle n'en est cependant pas moins robuste et est en accord avec des théories plus élaborées (Hillel, 1980 chap. 5; in Campbell, 1985, chap.9). Tant que  $R_1$  n'est pas épuisé, le régime d'évaporation est celui imposé par la demande climatique  $ET_0$ , (notons au passage qu'un sol nu peut être plus ou moins enherbé durant l'inter culture). En l'absence de culture ce premier réservoir est donc soumis à  $ET_0$  jusqu'à épuisement. Le réservoir superficiel protège en quelque sorte les couches profondes vis à vis de l'évaporation produisant un effet de mulch. En présence de culture, c'est le premier réservoir qui est sollicité par la plante. En dehors du cycle de culture on considère que l'évaporation peut affecter les couches au-delà de 10 cm lorsque  $R_1$  est épuisé mais de façon limitée. La couche sous-jacente contribue selon  $Es_2 = K_{sol}.exp(-(1-\theta_{R2}))ET_0$ . Dans cette formulation empirique qui exprime la résistance du sol à évaporer,  $K_{sol}$  est un paramètre de calage (voisin de 0.3 pour la plupart des sols), l'équivalent d'un coefficient cultural maximal sur sol nu,  $\theta_{R2}$  est une fonction témoignant du niveau de remplissage de  $R_2$ :  $\theta_{R2} = \text{Min}[1, R_2/RU_2]$ .  $Es_2$  peut s'annuler lorsque  $R_2$  est épuisé (atteint  $\theta_{pf}$ ) paramètre.

L'humidité du sol a fait l'objet d'un suivi par la méthode TDR également sur sol nu. Le régime d'évaporation du sol nu demeure proche de celui de l' $ET_0$  durant les 2 ou 3 premiers jours (pour des sols de  $RU$  moyenne) faisant suite à une pluie (selon l'importance de celle ci),

atteint des valeurs beaucoup plus faibles 6 jours après pour tendre enfin vers des valeurs négligeables beaucoup plus tard. La modélisation ici est en accord avec les différents stades du processus d'évaporation que propose la littérature (in Hillel, 1980 chap. 5; in Campbell, 1985, chap.9) avec ce phénomène. Durant le cycle de culture l'ETR totale est égale à  $Tp_1 + Es + Tp_2$ , considérant que l'évaporation du sol  $Es$  se limite durant cette période à celle de la couche de surface ( $R_1$ ).

### Le module plante (calcul du rendement)

L'indice foliaire LAI, est un témoin visible des potentialités productives (quantité de matière sèche) de la plante au cours de sa croissance. Un stress hydrique (ou azoté) momentané induit chez certaines cultures, comme le maïs ou le sorgho, un enroulement des feuilles (Olufayo, 1994), ou un arrêt de son évolution. Celle-ci est peut être décelée lorsque l'on réalise un suivi au moyen d'un appareillage adapté tel que le Piqhélios, qui mesure le rayonnement intercepté. La prédiction fiable du rendement requiert nécessairement une simulation satisfaisante du LAI.

### La simulation du LAI

PILOTE simule les effets du stress hydrique sur l'indice foliaire. On suppose en outre que tous les facteurs de production autres que l'eau sont à leur optimum. La formulation adoptée pour le LAI intègre la disponibilité en eau pour la plante par le biais d'un indice de stress fonction de l'évapotranspiration relative. Le LAI croît lorsqu'un le seuil d'indice thermique  $TT_{(j)}$  est dépassé. Ce seuil correspond à la température de levée. Pour la plus part des grandes cultures il est fixé à 100 ° jours. L'indice thermique est calculé selon l'expression :

$$TT_{(j)} = \sum_{k=1}^{k=j} (T_{moy} - T_b) \quad \text{Equation 31}$$

où  $T_{moy}$  est la température moyenne journalière et  $T_b$  la température de base (6° pour certaines grandes cultures telles que la betterave à sucre). L'expression du LAI est donnée par:

$$LAI_{(j)} = LAI_{max} \left[ \left( \frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^\beta \exp \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left( 1 - \left( \frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^\alpha \right) \right\} - (1 - stress_{hydrique}^\lambda) \right] \quad \text{Equation 32}$$

où  $LAI_{max_x}$  est la valeur maximale du LAI pour une culture croissant sous conditions non limitantes (déductible de la littérature ou par la mesure). Le paramètre  $t_m$  représente la somme des températures nécessaire pour atteindre le  $LAI_{max}$ . Sa valeur pour la plupart des cultures, et en particulier pour le maïs, correspond au cumul de températures entre semis et floraison.  $T_s$  est le cumul de température requis pour l'émergence. Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres de calage. Le paramètre  $\alpha$  permet à la fois de simuler croissance et sénescence. Le modèle assure le passage de  $\alpha = \alpha_1$  à  $\alpha = \alpha_2 (= \beta)$  lorsque  $TT$  dépasse  $t_m$ . On a donc en fait 3 paramètres à caler le dernier  $\alpha_2$ , pouvant l'être séparément de  $\alpha_1$  et de  $\tilde{\gamma}$ . Une valeur faible de  $\alpha_2$  ( $\alpha_2 < \alpha_1 / 30$ ) permet par exemple de simuler une sénescence lente (cas du maïs). Une procédure de calage automatique a été développée à cet effet. Le paramètre  $\lambda$  est un paramètre empirique traduisant l'aversion de la plante au stress hydrique. La pratique du modèle tend à montrer qu'une valeur constante de 1.25 pour  $\lambda$  peut être adoptée pour certaines grandes cultures (blé, maïs, soja, tournesol, sorgho,...). L'indice de stress est formulé selon l'expression :

$$stress_{hydrique} = \frac{\sum_{j=10}^j Tp}{\sum_{j=10}^j Tpm} \quad \text{Equation 33}$$

où  $Tp (= Tp_1 + Tp_2)$  est la transpiration réelle et  $Tpm$  est la transpiration maximale :

### Le calcul du Rendement en matière sèche

Le modèle calcule le rendement final en fruit ou grain (racine pour le cas de la betterave à sucre) selon l'expression :

$$Y_a = Y_m \text{ MIN}\{1; LAI_{moy}/LAI_{opt}\} \quad \text{Equation 34}$$

, où  $Y_m$  est le rendement racines en conditions non restrictives en eau.  $LAI_{moy}$  est le LAI moyen calculé durant une période critique (liée à l'impact du stress hydrique sur le rendement) dont les bornes correspondent à des stades phénologiques définis en sommes de températures ( $TS_1$ ,  $TS_2$ ).

$$LAI_{moy} = 1/N_j \sum_{Ts1}^{Ts2} LAI(j) \quad \text{Equation 35}$$

LAI<sub>opt</sub> est la valeur optimale que doit avoir le LAI durant cette même période critique pour obtenir le rendement maximal. Pour la plupart des cultures, hormis le tournesol qui a la réputation de mal valoriser l'eau, la valeur de LAI<sub>opt</sub> est de l'ordre de 90% du LAI<sub>max</sub>. Mais cela dépend bien entendu de l'allure même du LAI d'une part et de l'étendue de la période critique d'autre part. En condition d'eau non limitées, le rendement en racines est le produit de la matière sèche aérienne par l'indice de récolte potentiel HI<sub>pot</sub> et S(j) le rayonnement solaire incident (J m<sup>-2</sup>) dont la somme est calculée depuis la date de semis jusqu'à la date de maturité définie en somme de température T<sub>mat</sub> (accessible dans la littérature ou mesuré)

$$Y_m = HI_{pot} RUE \sum_{semis}^{maturité} S(j) I(j) \quad \text{Equation 36}$$

I(j) est la fraction de la radiation solaire interceptée (Moussi et Sacki, 1953) :

$$I(j) = 1 - e^{-k LAI(j)} \quad \text{Equation 37}$$

avec  $k = \min(1.0, 1.43 LAI^{-0.5})$  : coefficient d'extinction (Zaffaroni et Schneider, 1989)

RUE (g MJ<sup>-1</sup>) est l'efficience d'interception. Elle représente l'efficience avec laquelle le rayonnement intercepté est utilisé pour fabriquer de la biomasse aérienne. L'évolution au cours du cycle de ce paramètre est difficile à modéliser compte tenu de sa dépendance (mal connue) à de nombreux facteurs (Villalobos *et al.*, 1996). En conséquence il est préférable de proposer une valeur fixe pour ce paramètre voisine de celle atteinte à la maturité. L'approche utilisée ici pour le calcul de Y<sub>m</sub> est comparable à celle proposée par Villalobos *et al.*, (1996) et Chapman *et al.* (1993)

#### Modélisation de l'indice de récolte HI

L'indice de récolte est défini comme étant le rapport de la matière sèche de la racine de la betterave à sucre par rapport à la matière sèche totale. Sa prédiction semble poser des problèmes aux modèles de cultures dont la plupart se fondent sur une évolution de type degrés/jour pour modéliser l'évolution de ce facteur. Cette difficulté est souvent contournée en lui assignant une valeur moyenne souvent proche du HI<sub>pot</sub>, indice de récolte potentiel, voisin

de 0.5 pour bon nombre de grandes cultures. Si cela s'avère satisfaisant pour des cultures dont l'indice de récolte est peu sensible au stress hydrique comme le sorgho et le tournesol (Mailhol *et al.* 1997c, Cox et Joliff, 1986) il en est tout autrement pour des cultures comme le maïs ou le blé surtout lorsque surviennent des stress hydriques sévères en phase de remplissage du grain. Dans une logique de conformité avec la démarche fondée sur le LAI, on se propose de modéliser HI selon l'expression suivante :

$$HI = \text{Min} [HI_{\text{pot}} ; (HI_{\text{pot}} - a_r (LAI_{\text{st}} - LAI_{\text{moy}}))] \quad \text{Equation 38}$$

où  $LAI_{\text{st}}$  est la valeur seuil de LAI (moyen calculé sur la période critique) en dessous de laquelle l'indice de récolte décroît linéairement (paramètre  $a_r$ ) depuis sa valeur potentielle.

### Applications de la modélisation

#### Cas d'une parcelle planée ou bénéficiant d'un système permettant l'évacuation de l'excès d'eau hivernal.

Le modèle PILOTE dans sa version classique doit être préalablement calé et validé sur les parcelles non soumises à l'excès d'eau hivernal. Il s'agit des parcelles nivelées sans raies et irriguées par aspersion  $P_1$  et la parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement  $P_3$ . La méthodologie de calage adoptée est décrite dans Mailhol *et al.*, (1997) et Mailhol *et al.*, (2004), elle consiste en premier lieu à caler les paramètres de forme du LAI sur un traitement sans stress hydrique, puis le paramètre de sensibilité au stress  $\lambda$ , sur un traitement déficitaire en irrigation.

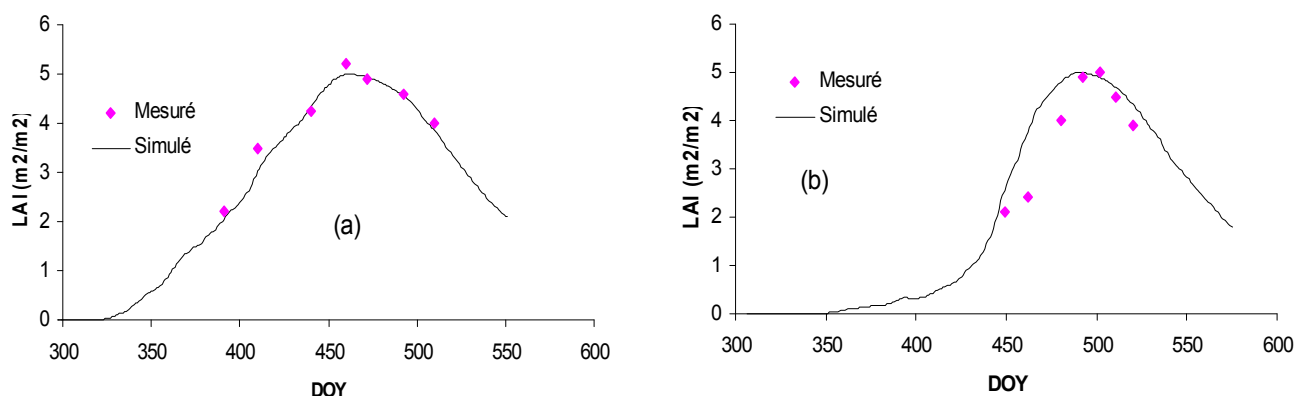
#### Calage des paramètres

Les paramètres régissant les durées de cycles en somme de température depuis le semis (en température de base :  $T_b = 6^\circ$ ) :  $T_f = 1050$ , floraison,  $T_{\text{mat}} = 1800^\circ$ , maturité, et  $T_{s1} = 850^\circ$  et  $T_{s2} = 1500^\circ$  période de début et de fin de forte sensibilité au stress hydrique (fin des irrigations recommandées), sont extraits de la littérature. Concernant l'efficacité de conversion (RUE), nous sommes basés sur les potentialités de production de la région (approchant les 120 T/ha) obtenues au près du CTCS. Sur la chronique d'années disponibles (1995-2006) nous avons réalisé un certain nombre de simulation jusqu'à obtenir, par une analyse de type essais- erreurs, au moins sur une année ce rendement potentiel. Ce dernier aurait été obtenu en 2005 pour un semis précoce (début Octobre) avec une valeur de 119 T/ha

(taux d'humidité de la racine à 63%) et ce pour la valeur  $RUE = 2.3 \text{ gMJ}^{-1}$ . Au préalable l'indice de récolte potentiel  $HI_{pot} = 0.75$ , avait été déterminé expérimentalement. La vitesse de croissance racinaire adoptée en  $\text{md}^\circ/\text{jour}$  dans cette version du modèle est déduite du suivi tensiométrique permettant le suivi de l'évolution du plan de flux nul ainsi que de profils racinaires intempestifs. Un cumul de température depuis la plantation remplace, dans cette version, la durée d'installation du système racinaire en jour dans les trente premiers centimètres du sol.

Afin de tenir compte de l'impact de températures élevées en fin de cycle sur le rendement, un seuil de température critique a été fixé :  $T_{crit} = 28^\circ\text{C}$ . Il s'agit d'une température moyenne journalière, car PILOTE n'utilise que cette donnée. Ce seuil est déduit de la littérature (Solter, 1999), correspond à des températures journalières maximales pouvant être largement supérieures à ce seuil. Lorsque  $T^\circ > 28^\circ\text{C}$  l'efficacité de conversion est affichée à 0 ce jour là. Les caractéristiques du sol : teneurs en eau volumique à la capacité au champ ( $\theta_{fc}$ ) et au point de flétrissement ( $\theta_{pf}$ ) sont respectivement de 0.36 et 0.18, soit une réserve utile  $RU = 180 \text{ mm/m}$ . La valeur maximale du coefficient cultural,  $K_{cmax}$  est fixée à 1.05 (FAO 24). Quant au rapport  $RFU/RU$  on le fixe à 0.55 valeur inférieure à la valeur classiquement retenue de  $2/3$ , pour tenir compte des conditions parfois extrêmes de la demande climatique à de telles latitudes (Mailhol *et al.*, 1997, Mailhol *et al.*, 2004). Concernant l'initialisation de la réserve en eau du sol, on fait l'hypothèse que celle-ci est quasiment épuisée en fin de saison sèche (30 Septembre).

Le LAI a été calé sur les données de 2006, (Figure 46a) année où le rendement a été le plus élevé. Le jeu de paramètres de forme a été ensuite validé sur le LAI des placettes amont de la parcelle nivelée dotée de raies (Figure 46b).



**Figure 46.** (a) Calibration (année 2006) et (b) Validation (2005) du LAI de la betterave à sucre dans le Gharb [ $\alpha_1 = 1.5$  ;  $\beta = 0.6$  ;  $\alpha_2 = 3.4$  ;  $T_{mat} = 1800^\circ$ ,  $T_f = 1050^\circ$  ;  $T_{s1} = 850^\circ$  ;  $T_{s2} = 1500^\circ$ ]

On notera qu'en dépit de dates de semis très différentes et de conditions climatiques contrastées (2006 cycle pluvieux, 2005 cycle sec) le modèle simule de façon acceptable le LAI. Au préalable, le coefficient d'aversion au stress hydrique  $\lambda$  a été calibré sur le traitement en gravitaire de P3 en 2005. La valeur  $\lambda = 2.0$  permet d'obtenir la valeur moyenne du rendement de ce traitement, soit 83 T/ha.

### Validation des paramètres du modèle PILOTE

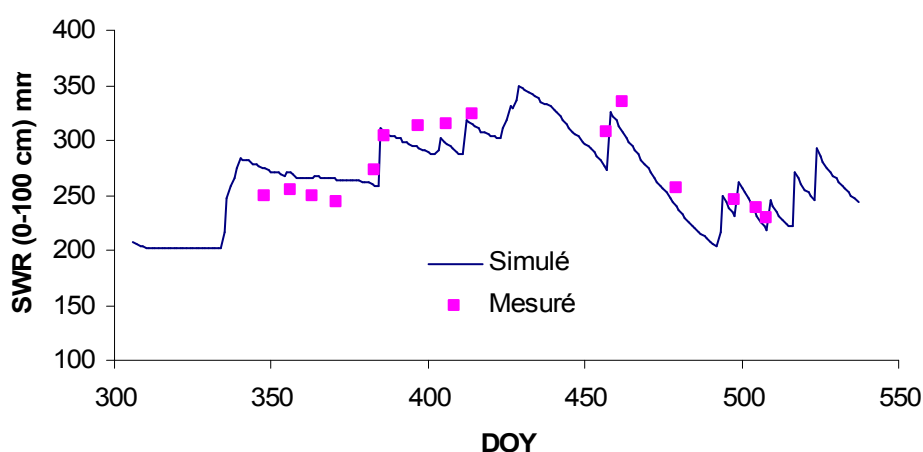
La validation sur le cas des traitements en aspersion nécessite de disposer des fichiers irrigation. Concernant les traitements en gravitaire, la connaissance des doses infiltrées n'est pas immédiate et nécessite le recours au modèle d'irrigation. Nous pourrions opter directement pour le choix de la solution "modèle couplé" SOFIP, lequel permet d'estimer la valeur moyenne du rendement à l'échelle de la parcelle en intégrant les différentes sources d'hétérogénéité. Mais SOFIP nécessitant un calage spécifique, nous choisissons d'utiliser la solution "calage en temps réel" du modèle RAIEOPT consistant à caler par méthode inverse les paramètres sur la raie "moyenne" dans le but de calculer les doses moyennes infiltrées dans le sens amont aval de la parcelle. Le fichier des doses ainsi obtenues nous permet avec PILOTE d'estimer un rendement moyen.

### Résultats

Les rendements en aspersion sont surestimés en 2006 : 102 contre 90 T/ha et un peu moins en gravitaire : 101 contre 98 T/ha. Le rendement est en revanche bien simulé sur la parcelle de l'agriculteur : 105 vs 103 T/ha. En 2005, le rendement sur la parcelle nivelée sans raies (P1)

est très correctement simulé : 85 contre 82 T/ha mesuré. En 2004, le rendement est un peu moins bien simulé pour la parcelle nivelée dotée de raies (83 contre 70 T/ha). En fait, les chaumes de cannes à sucres n'ont pu être totalement dégradées en inter saison. Il est fort probable qu'elles aient constitué un obstacle aux eaux de ruissellement aussi bien pour les précipitations que pour les irrigations, entraînant localement des excès d'eau. En revanche, le rendement est fortement sous estimé sur le traitement conduit en sec pour 2005 : 10 vs 21 T/ha mesuré.

Concernant les autres compartiments du modèle, on constatera que le bilan hydrique en parcelle nivelée sans raies est simulé de façon acceptable sur la base des mesures effectuées par la méthode gravimétrique (Figure 47).



**Figure 47.** Simulation du bilan hydrique sur P1 en 2005 (CE = 0.82, RMSE = 15 mm)

Le Tableau 10 rassemble l'ensemble des paramètres du modèle PILOTE relatifs à la betterave à sucre au Gharb avec leur indice de sensibilité. Cet indice SI est calculé sur la base d'une variation de 25% concernant les paramètres pouvant faire l'objet d'un calage quant à ceux susceptibles d'être tirés de la littérature (\*) comme les températures des stades végétatifs une variation de 10% seulement est adoptée. Cette limite de 10% (paramètres affectés est choisie pour éviter un chevauchement possible des différentes stades d'une part et d'autre part afin d'éviter qu'une variété qualifiée de précoce ne devienne tardive et vis et versa. L'expression de SI (Ng ; Loomis, 1994) est donnée par :

$$SI = (\Delta R\acute{e}/R\acute{e}) / (\Delta P/P)$$

Où  $\Delta R\acute{e}/R\acute{e}$  représente la variation relative du résultat (une sortie du modèle) et  $\Delta P/P$ , la variation relative du paramètre vis-à-vis du paramètre optimal. La sortie du modèle sera le rendement bien que quelques paramètres affichent une sensibilité plus nette vis à vis du bilan hydrique. Afin de garantir une certaine représentativité de l'ensemble des paramètres, il convient d'établir cette analyse de sensibilité sur un traitement présentant un niveau de stress significatif. Pour cela le traitement de la parcelle en aspersion nivelée de la campagne 2004-2005 a été retenu. Le rendement obtenu pour cette campagne a été de 80 T/ha alors que le potentiel pour même campagne est proche de 105 T/ha. Dans cette analyse la variation adoptée pour les paramètres ne sera pas la même selon leur origine. Les paramètres susceptibles d'être extraits de la littérature comme par exemple les températures de stades ne feront l'objet que d'une variation de plus ou moins 10%. Une variation plus élevée risquerait en effet de faire chevaucher des stades ou correspondre à un changement de variété (plus précoce ou plus tardive), ce qui n'aurait pas de sens. Il peut en être de même pour une classe de sol. Pour les autres paramètres, plus particulièrement ceux pouvant faire l'objet d'un calage, la variation adoptée sera de  $\pm 25\%$ .

**Tableau 10.** Paramètres du modèle PILOTE pour la betterave à sucre au Gharb avec  
SI : indice de sensibilité (\* :  $\Delta P = 10\%$ )

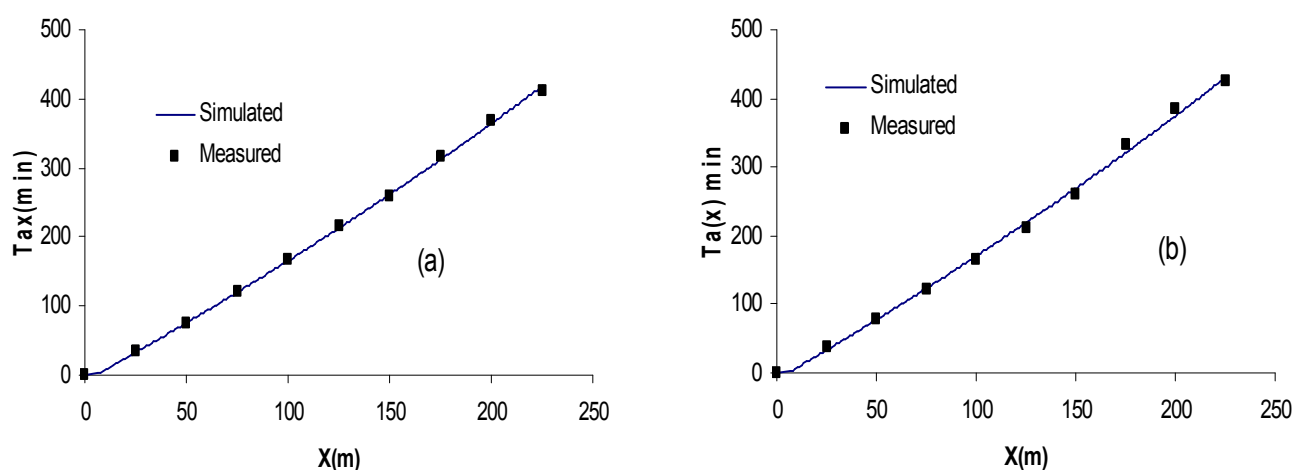
| Paramètres                                            | Valeurs obtenues par                            | SI    | SI    |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|
| * : accessible dans littérature ou mesurables         | calages ou mesurées ou tirées de la littérature | -x%   | +x%   |
| Teneur en eau volumique à la capacité au champ (*)    | 0.36                                            | -0.8  | 0.8   |
| Teneur en eau volumique au point de flétrissement (*) | 0.18                                            | 0.8   | -0.8  |
| Profondeur racinaire (m)                              | 1                                               | -0.4  | 0.25  |
| Rfu/Ru                                                | 0.55                                            | -0.3  | 0.25  |
| Accroissement Racinaire (m/j)                         | 0.0125 vs 0.001md°J                             | -0.35 | 0.3   |
| Durée d'installation système racinaire (°C),          | 400°                                            | 0.3   | 0.4   |
| Température critique (moyenne journalière)            | 28°                                             | 0     | -0.2  |
| Coefficient. Cultural Max (*)                         | 1.05                                            | 0.7   | -0.7  |
| Coeft Max d'évap sol                                  | 0.3                                             | 0.02  | -0.03 |
| Coeft d'aversion au Stess hydrique                    | 2                                               | 0.2   | -0.2  |
| Densité réelle (*)                                    | 10                                              | 0.3   | -0.3  |
| Densité Optimale                                      | 10                                              |       |       |
| Humidité racine (%)                                   | 63                                              | -     | -     |
| Efficience Conversion (RUE*0.5), (*)                  | 2.3                                             | -1    | 1     |
| Indice de récolte Potentiel (*)                       | 0.75                                            | -1    | 1     |
| Seuil LAI stress Hydrique                             | 2.                                              | 0.15  | -0.2  |
| Coeft décroissance Indice de Récolte                  | 0.15                                            | 0.05  | -0.1  |
| Seuil Début Phase Critiq. (°C), (*)                   | 850                                             | 0.5   | -0.5  |
| Seuil Fin de phase critiq (°C), (*)                   | 1500                                            | 0.2   | -0.2  |
| Température relative au LAI max (°C), (*)             | 1050                                            | 0.05  | -0.1  |
| Température Maturité (°C), (*)                        | 1800                                            | -0.5  | 0.9   |
| Température émergence (°C), (*)                       | 100                                             | -0.05 | 0.05  |
| Tbase (°C), (*)                                       | 6                                               | 0.25  | 0.9   |
| LAIMAX, (*)                                           | 5                                               | 0     | 0.1   |
| ALPHA                                                 | 1.5                                             | 0.1   | -0.14 |
| BETA                                                  | 0.6                                             | 0.01  | -0.02 |
| GAMMA                                                 | 3.4                                             | 0.2   | -0.14 |

Les paramètres les plus sensibles sont ceux définissant la réserve utile du sol ( $\theta_{fc}$ ,  $\theta_{pf}$ ), et  $K_{cmax}$ . Ces paramètres ont un impact direct sur le bilan hydrique. Bien évidemment

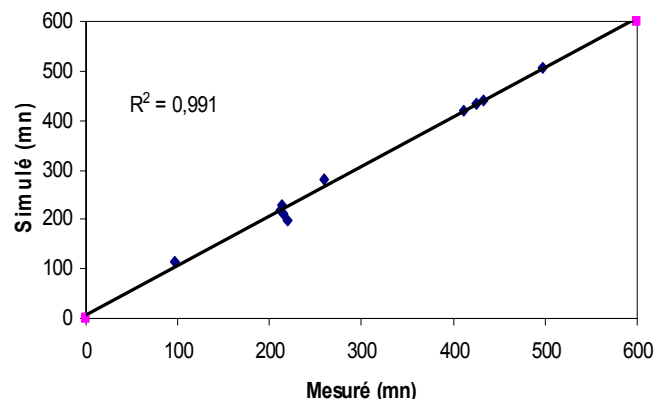
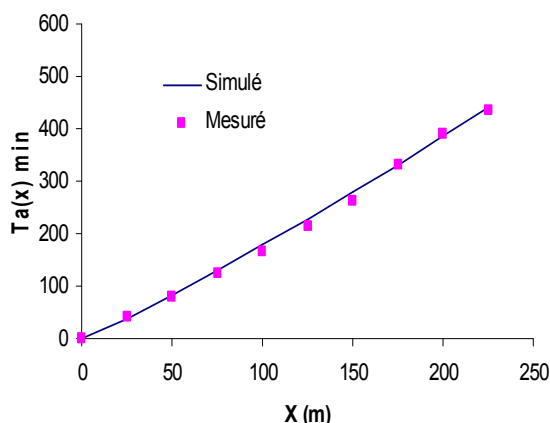
l'efficience de conversion (RUE) qui a un effet multiplicatif direct dans l'accumulation de matière sèche totale est le paramètre le plus sensible au même titre que l'indice de récolte potentiel. Ces deux paramètres peuvent être tirés de la littérature ou faire l'objet d'un calage, mais dans les deux cas ils sont représentatifs d'une culture (ou d'une variété). Dans l'ensemble les paramètres plus spécifiques aux principes du modèle sont assez peu sensibles. Il en va par exemple ainsi des deux paramètres permettant de faire évoluer l'indice de récolte potentiel, pour lesquels on a dû générer un stress bien plus sévère ( $\rightarrow 41$  T/ha) en réduisant l'apport d'eau (option pilotage automatique).

### Calage du Modèle SOFIP

Le calage de SOFIP concerne essentiellement les paramètres régissant l'infiltration : moyenne et écarts types. Il s'agit des paramètres  $\lambda_c$  et  $K_s$ . Nous ferons l'hypothèse que ces paramètres sont faiblement corrélés en fixant a priori  $r_{\lambda_c, K_s} = 0.2$ . Les valeurs moyennes de ces paramètres ont été calées sur la raie médiane de l'irrigation n° 3 et validés sur l'irrigation n° 6 de 2005. Le débit moyen des 16 raies ayant fait l'objet d'un suivi d'avancement était de 1.15 L/s avec un coefficient de variation voisin 10%. Quant au coefficient de variation des temps d'avancement des raies, il variait de 7 à 16%. Pour ces deux événements le déficit de saturation  $\Delta\theta$  était de 0.18 et 0.20 respectivement. Le paramètre  $\chi$  régissant le caractère transitoire de l'infiltration est fixé à 40 pour ce type de sols (Mailhol, 2003). Le résultat du calage donne  $\overline{\lambda_c} = 40$  cm et  $\overline{K_s} = 0.3$  cm/h. Les Figure 48 et Figure 49 présentent respectivement le résultat du calage et de la validation.



**Figure 48.** Calage (a : irrigation n°3) et validation (b : irrigation n°6) des paramètres moyens  $\overline{\lambda_c}$  et  $\overline{K_s}$  du modèle SOFIP.



**Figure 49.** Validation de SOFIP sur l'avancement de la raie médiane : irrigation N°4 et validation de l'avancement aux abscisses  $x = 125$  et  $x = 225$  m (arrosages 2 à 6)

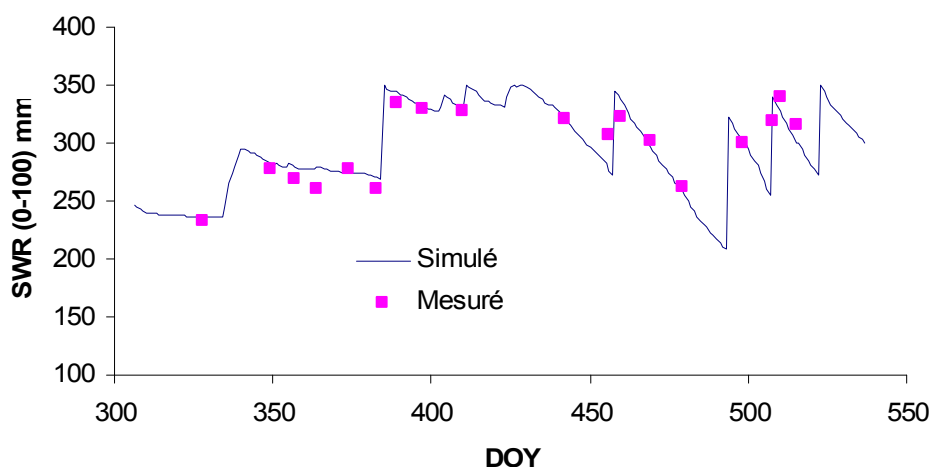
Les temps d'avancement moyens sont dans l'ensemble assez bien simulés. Cela résulte du fait que les paramètres  $\lambda_c$  et  $K_s$  ont été correctement calibrés d'une part et que d'autre part le déficit de saturation avant chaque arrosage est l'est également.

### Variabilité de l'avancement

Les paramètres permettant de simuler la variabilité de l'avancement sont les coefficients de variation des paramètres de l'infiltration,  $r_{lc, Ks}$  et ceux du débit en tête de parcelle. Le coefficient de variation ( $C_v$ ) de ce dernier peut être estimé par la mesure à l'aide d'un seuil (seuil RBC). Pour un jeu de  $C_v$  fixé, on peut encore jouer sur pour les débits pour réduire ou augmenter sensiblement la variabilité de l'avancement, sachant que  $\lambda_c$  et  $K_s$  sont corrélés négativement. (Mailhol *et al.*, 2005). Des valeur de  $C_v(\lambda_c)$  et  $C_v(K_s)$  de 15 et 25% respectivement permettent de simuler de façon acceptable la variabilité de l'avancement sur l'ensemble des irrigations. Le fichier paramètres relatif à SOFIP, (décrits au chapitre III) pour les saisons 2004-2005 et 2005-2006 est donné en annexe V.

### Doses infiltrées et bilan hydrique

La Figure 50 qui représente une simulation du bilan hydrique sur une placette amont de la parcelle gravitaire nivelée dotée de raies P3, nous permet de vérifier la validité du couplage dans SOFIP entre modèle de culture et d'irrigation.



**Figure 50.** Simulation du bilan hydrique sur une placette amont de P3 en 2005 (CE = 0.832, RMSE= 12 mm)

### Simulation des rendements

SOFIP simule des rendements moyens de 102 T/ha en 2006 et 85 T/ha en 2006 et 2005 respectivement avec des coefficients de variation de 5% et 12%. Nous ne disposons pas de mesures de rendement à l'échelle de la parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement P<sub>3</sub>, mais seulement au voisinage des sites de prélèvements gravimétriques (5 sites amont, 5 sites au milieu et 5 sites en aval de la parcelle). On ne peut donc guère conclure quant aux capacités du modèle à prédire la variabilité du rendement. Au regard des valeurs mesurées il apparaît que le modèle surestime la variabilité en 2005. Cela peut sembler normal étant donné que d'autres causes non prises en compte par le modèle sont susceptibles d'affecter le rendement.

### Efficience de l'irrigation pour la saison 2004-2005

Cette saison a fait l'objet de 6 irrigations alors que celle de 2005-2006 n'en a eu que deux dont la première a eu lieu juste après le semis.

Sur le cycle de culture la pluviométrie est de 525 mm et l'ETM de 600 mm. L'efficience d'application est définie selon Burt *et al.* (1997) par :

$$Ea = 100 \times \text{Dose moyenne d'irrigation contribuant à la dose requise} / \text{Dose moyenne apportée}$$
 Cette dose apportée est de l'ordre de 6000 m<sup>3</sup>/ha pour la saison 2004-2005. SOFIP nous propose une valeur moyenne d'Ea pour la saison d'irrigation de 70% avec un coefficient de

variation de 10%. Cette valeur d'Ea est plutôt satisfaisante pour une irrigation gravitaire et elle correspond en fait à l'efficience adoptée par les projets d'aménagement pour la PTI et la STI. Elle résulte de la nature des sols. Ces derniers ont la possibilité de stocker de façon quasi instantanée des doses importantes grâce à la présence de macro fissures avant irrigation. Le coefficient d'uniformité qui se définit comme le rapport de la dose minimale à la dose moyenne infiltrée est de fait assez élevé ( $CU = 85\%$ ,  $Cv = 12\%$ ). La dose minimale moyenne infiltrée est de 70 mm ( $Cv(15\%)$ ). Bien que beaucoup moins développées qu'au cœur de la saison chaude, ces fissures donnent cependant une forme assez linéaire aux lois d'infiltration et d'avancement (Mailhol *et al.*, 1993). Du fait d'un  $K_s$  faible, la majeure partie de la dose apportée à une abscisse donnée sert à combler la macro porosité et, pour peu que le front d'avancement parvienne à l'extrémité de la parcelle, l'uniformité affiche des valeurs élevées. C'est une des raisons pour lesquelles il n'est pas nécessaire de perdre inutilement de l'eau en colatures, des temps d'irrigation de l'ordre de 1.10 à 1.15 fois le temps médian d'avancement sont suffisants dans des conditions de variabilité moyennes ( $Cv(TL) < 15\%$ ) pour garantir une uniformité acceptable.

Les pertes en colatures moyennes pour les durées d'arrosage adoptées sont de 20% selon SOFIP avec, ce qui est généralement le cas, une forte variabilité ( $Cv \approx 75\%$ ) compte tenu des stratégies d'arrêt des arrosages (on coupe l'alimentation lorsque le front d'avancement de chaque raies est parvenu à son extrémité à l'exception des raies de bordure) et de la variabilité de l'avancement. Le pourcentage de pertes en colature mesuré dans le déversoir de mesure est de 18% (la colature de recueillement des eaux présente elle aussi des fissures *et alimente* les abords par infiltration). Compte tenu des pertes lors du transfert vers le déversoir de mesure, on conclura que le modèle simule de façon satisfaisante la dose moyenne infiltrée au cours de la saison. Enfin le drainage moyen sur la parcelle au cours du cycle est de 80 mm ( $Cv(18\%)$ ).

### **Test d'une pratique améliorée sur le scénario climatique 2004-2005**

Les résultats consignés dans le Tableau 11 permettent de constater le gain apporté par une pratique d'irrigation consistant à décider de l'opportunité d'irriguer lorsque la RFU est épuisée. On suppose que l'arrêt de l'alimentation correspond au temps d'arrivée de la raie médiane. Le débit moyen alimentant chaque raie est fixé à 1.5 L/s avec un  $Cv$  supposé de 10%. Le rendement passe de 85 à 109 T/ha et ce, pour une dose apportée de 4800 m<sup>3</sup>/ha, soit une économie d'eau de 1200 m<sup>3</sup>/ha. L'efficience d'application du fait de coefficients de stockages plus élevés avant chaque irrigation est très significativement améliorée  $Ea = 90\%$ . Les pertes en colatures sont considérablement réduites, elles sont de 12% en moyenne du fait

que les temps d'avancement sont plus élevés et que l'on coupe l'alimentation relativement plus tôt. Cela a bien évidemment des conséquences négatives sur le coefficient d'uniformité qui chute de 85 à 75% mais demeure somme tout acceptable. Le drainage moyen est fortement réduit 49 mm ainsi que le pourcentage de placettes ayant un drainage supérieur à 50 mm qui est réduit de moitié. Cette pratique engendre en conséquence des risques environnementaux beaucoup plus faibles que la pratique qui a été réellement appliquée.

**Tableau 11.** Simulation pratique réelle / pratique améliorée (scénario 2004-2005)

| Critères de Performance     | Pratique réelle | Pratique améliorée |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| Rendement (T/ha)            | 85 (Cv = 12%)   | 109 (Cv = 4%)      |
| Dose brute apportée (m3/ha) | 6000            | 4800               |
| Ea (%)                      | 70 (Cv = 15%)   | 90 (Cv = 8%)       |
| CU (%)                      | 85 (Cv = 12%)   | 75 (Cv = 16%)      |
| Pc (%)                      | 20 (Cv = 75%)   | 12 (120%)          |
| Drainage                    | 80 (Cv = 18%)   | 49 (29%)           |

### Conclusion relative à la pratique de la raie modernisée

Nous nous plaçons dans le cadre d'une parcelle nivelée dotée de raies où ce qu'on appelle communément raie modernisée. Concernant la période hivernale, et pour l'évaluation des performances de la raie vis à vis du ruissellement un modèle de simulation de celui-ci a été développé dans le cadre de cette thèse. Ce modèle présente un caractère opérationnel et prédictif. Il prend en effet en compte les processus physiques de transfert de l'eau dans le sol et au niveau des raies. C'est un modèle qui en outre permet de traiter le cas d'événements pluviométriques complexes. Ce modèle a été développé sur la base du schéma hortonien de genèse du ruissellement. On est en droit de penser que ses performances pourraient être améliorées (i) en prenant un pas de temps inférieur au quart d'heure pour l'enregistrement des précipitations et (ii) en essayant de faire varier le coefficient de rugosité en fonction des stades de la culture. Ce modèle peut être d'une grande utilité pour le dimensionnement des fossés d'assainissement dans la plaine du Gharb aussi bien pour les périmètres nouveaux que lors de la réhabilitation des périmètres existants. La simulation de l'événement extrême avec une période de retour d'une année a mis en valeur le rôle fondamental des raies pour l'évacuation des excédents d'eau à l'échelle de la parcelle agricole et delà le rôle de drainage de surface. Il en ressort que les ouvrages destinés à la collecte des eaux de ruissellement à l'aval des

parcelles sont sous dimensionnées. Ceci résulte du fait que les formules utilisées par les ingénieurs conseils sont basées sur des approches empiriques fort certainement non adaptées au contexte région du Gharb. Actuellement, dans beaucoup de parcelles irriguées gravitairement (mode traditionnel), une bande aval de 8 à 20m présente des signes d'hydromorphie remarquables. Ce constat pourrait résulter du sous dimensionnement des ouvrages évacuateurs..

Concernant, la deuxième partie de la campagne agricole, s'étalant du printemps jusqu'à la récolte, l'irrigation s'avère fondamentale pour l'amélioration des rendements. L'objectif que nous nous sommes fixés était d'analyser l'impact de l'irrigation à la raie sur le rendement de la betterave sur une parcelle n'ayant pas souffert d'excès d'eau en hiver. A cet effet, le modèle SOFIP analysant l'impact des pratiques d'irrigations à la raie sur le rendement et les efficiences a été utilisé. Ce modèle consiste en un couplage d'un modèle prédictif de l'irrigation à la raie (RAIEOPT) et un modèle de culture (Pilote) à travers un générateur de paramètres. Ce GP est basé sur la méthode de simulation de Monte Carlo laquelle a été modifiée pour tenir compte des spécificités du processus d'avancement observées à l'échelle de la parcelle pour N raies dans différentes conditions. Le modèle SOFIP et ses composants ont été calés et validés pour le cas de la betterave à sucre pour la plaine du Gharb. Ce modèle simule bien les rendements à l'échelle de la parcelle agricole et propose une pratique améliorée de la gestion de l'irrigation à la raie. Ce modèle a mis en évidences les économies d'eau pouvant résulter d'une pratique améliorée de la raie longue. C'est une approche de modélisation opérationnelle qui aide à identifier les pratiques d'irrigation susceptible d'atténuer les risques de percolation profonde DP pour un contexte donnée de sources de variabilités tout en assurant un niveau de rendement acceptable pour l'agriculteur. Ce modèle à caractère prédictif peut être utilisée aussi bien en analyse des performances à posteriori qu'en temps réel des irrigations à la parcelle, en planifications des irrigations à l'échelle de la campagne agricole au niveau de la parcelle mais aussi en vue de prévision et de pilotage des irrigations. Ce modèle reste évolutif. Il peut être étendu à l'échelle de l'exploitation agricole. Les autres cultures dont le semis se fait sur billons peuvent être intégrées en respectant les processus de calage et de validation. Il pourra répondre aux attentes des gestionnaires des périmètres irrigués en terme de planification et de pilotage des irrigations en essayant de le spatialiser.

Comme signalé précédemment, les avantages de la raie modernisée vis à vis du ruissellement hivernal et de l'irrigation ont pu être explicités. Actuellement, les superficies aménagées en gravitaire classique dans le périmètre du Gharb sont de l'ordre de 86 500 ha. Toutes les

parcelles sont censées être nivelées au départ lors des travaux d'aménagement. Aujourd'hui, la situation est telle que le nivellement est dégradé sur l'ensemble des parcelles gravitaires. Ceci résulte d'une part de (i) la réalisation des travaux à façons opérées par les agriculteurs, (ii) du manque d'entretien du nivellement et de la pratique d'irrigation à la robta (la mise en place de petits bassins porte atteinte à l'état du nivellement. Il est à rappeler que compte tenu des dispositions du code des Investissements Agricoles de 1969, et en considérant que le nivellement est un équipement interne, l'entretien de celui-ci incombe aux agriculteurs. Un effort important doit être entrepris dans le Gharb pour la remise en état du nivellement des parcelles des agriculteurs ce qui est de nature à permettre aux cultures pratiquées en automne et en hiver d'exprimer toutes leurs potentialités en engendrant aussi des économies d'eau substantielles à l'échelle de la parcelle (diminution des redevances des agriculteurs) et du périmètre par la diminution des volumes pompés (frais d'énergie).

Après avoir étudié l'utilisation conjuguée de la raie modernisée pour le ruissellement hivernal et l'irrigation gravitaire, il est important de s'intéresser au comportement d'une parcelle non nivelée irriguée en aspersion dans le même contexte du Gharb. En effet, ce système a connu un essor important durant les années 80. C'est l'objet du paragraphe suivant.

### **III.3. Modélisation du système aspersion**

#### **III.3.1. Introduction**

Le volet expérimental a permis de relever que le système de raies présente de bonnes performances pour l'évacuation des eaux à l'échelle de la parcelle agricole. Les expérimentations ont démontré aussi que les parcelles nivelées avec ou sans raies ne sont pas sujettes aux excédents d'eau. Le modèle de ruissellement et le logiciel SOFIP ont permis de conclure que la raie longue présente de bonnes performances pour l'évacuation des eaux excédentaires en hiver et pour l'amélioration de l'application de l'eau à la parcelle. Par contre la parcelle non nivelée (et sans raies) connaît des stagnations importantes. Sur le plan expérimental, l'impact des excédents d'eau sur la production de la betterave à sucre a été clairement démontré pour les 3 campagnes de mesures.

Le choix d'un système d'irrigation pour une région donnée dépend généralement des impératifs techniques, économiques et sociologiques. Si le système gravitaire reste le plus ancien dans le Gharb, l'irrigation par aspersion est assez récente et a fait son apparition en 1978 au secteur P7 de la PTI. Les largeurs de soles correspondant aux longueurs de raies, au niveau des schémas d'aménagements préconisés pour le Gharb, résultaient des expérimentations réalisées pour des sols plus filtrants dans le périmètre du Tadla et portaient sur des longueurs de raies variant de 80 m à 150 m. Ce système, a été introduit pour des

raisons de mécanisation de la récolte de la canne à sucre en offrant des longueurs d'attaque plus importantes aux récolteuses. L'absence de nivellement était considérée comme un avantage. Ce système permettait aussi, d'accélérer le rythme d'équipement pour atteindre le 1.000.000 ha que le Maroc s'est fixé comme objectif à atteindre à l'horizon 2000, Lahlou *et al.*, (1989). Les expérimentations réalisées sur l'irrigation gravitaire ont permis de montrer que la raie peut présenter des performances satisfaisantes sur une longueur de 240 m. (Mailhol *et al.*, 1999). En fait, la superficie aménagée aujourd'hui en aspersion dans le Gharb est d'environ 20 000 ha. Cela a nécessité des investissements importants pour une mise en place d'une infrastructure lourde portant sur les stations de pompages : 8 stations de mise en pression, 6 tours de 70 à 80 m de hauteur pour la régulation, 2 ballons charlottes, 93 km de conduites gros diamètres, et 244 Km de conduites petits diamètres et 900 bornes d'irrigation dominant en moyenne 10 ha chacune. L'exploitation de cette infrastructure se trouve confrontée à des frais d'énergies et de maintenance de plus en plus élevés. Aujourd'hui, la destruction des compteurs des bornes et le recours à la facturation forfaitaire font que les volumes consommés par hectare sont souvent supérieurs à ceux consommés au niveau des secteurs gravitaires avoisinants. Il faut encore souligner qu'au niveau de ces secteurs, les dépressions sont sujettes aux excédents d'eau durant les périodes hivernales. Des stagnations et des signes d'hydromorphie sont constatés au niveau des dépressions dominées par ce système selon une enquête réalisée sur le terrain (Taky, 2003).

L'impact de la submersion a été mis en évidence sur la culture de betterave à sucre. La question reste posée concernant la variation des rendements de cette culture suite aux submersions qui peuvent être générées durant les périodes hivernales selon les hydraulicités des campagnes agricoles. Le but de la modélisation est d'essayer de pouvoir répondre à ce genre de questionnement.

### **III.3.2. Etat de l'art**

Les cultures d'hiver sont fréquemment soumises à des périodes d'engorgement en eau du sol. Ainsi, l'effet d'un engorgement sur la croissance de la plante revêt un grand intérêt pour l'orientation des pratiques culturales et des aménagements permettant de lever la contrainte. Même si la littérature témoigne de la mise en œuvre de nombreuses recherches sur cette problématique, il apparaît que ces études sont très fragmentaires et essentiellement qualitatives (Meynard, 1985). Il reste de nombreux éléments à apporter sur la caractérisation de la contrainte d'engorgement, la quantification du stress subi par la plante en condition d'excès d'eau et des conséquences sur la croissance.

L'effet d'un excès d'eau est souvent pris dans les modèles de croissance et de développement des cultures d'une façon empirique ou statistique (Cavazza et Rossi Pisa, 1988 ; Pons, 1988 ; Kanwar *et al*, 1988 ; Evans *et al*, 1991 ; Ahmad, 1992). Le plus souvent une contrainte moyenne est estimée sur la durée du cycle, pondérée ou non par des facteurs de sensibilité de la culture selon les phases de développement. Cette contrainte est appliquée en fin de cycle sur le rendement final.

L'intérêt de l'utilisation de modèles de simulation de cultures dans une perspective d'aménagement et d'aide à la décision a été démontré (Napmod, CERES, HYDRA, SOYGRO, SWATRE) (Pereira *et al*, 1995). Les modèles de culture offrent un cadre conceptuel robuste mis à l'épreuve depuis plus de 25 ans sur de nombreuses espèces et dans de nombreuses conditions pédoclimatiques. Ces modèles qui simulent le développement de la plante et son utilisation de l'eau ont un compartiment hydrique et un compartiment croissance et développement. Ce dernier peut être de complexité variable. Ruelle (1995) a relevé que Jones et Ritchie (1990) ont dénombré même de façon non exhaustive 41 modèles. Parmi les plus connus le modèle EPIC (Williams *et al*, 1984) premier modèle générique, est développé pour répondre à des préoccupations agro-environnementales, CERES Maïs (Ritchie *et al*, 1986), le modèle ARIBLE pour le blé (Brisson *et al*, 1996), et comme modèles adaptés à plusieurs cultures on trouve le modèle STICS (Brisson *et al*, 1998) et le modèle SUCROS. Actuellement, la tendance est la mise au point de modèles génériques et agro-environnementaux qui prennent en compte les pratiques. C'est le cas du STICS avec ses récents développements (Brisson *et al*, 1998, 2002, 2003). STICS est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Ses variables d'entrées sont relatives au climat au sol et au système de culture. Ses variables de sortie sont relatives à la production (quantité et qualité), à l'environnement et à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture. L'objet simulé est la situation culturale pour laquelle on peut définir de façon déterministe un milieu physique et un itinéraire technique homogènes. Les grands processus simulés sont la croissance et le développement de la culture ainsi que les bilans hydrique et azoté. Les formalisations choisies reposent le plus souvent sur des analogies connues ou sur la simplification de formalisations plus complexes. (Brisson *et al*, 2002). Ce modèle est adapté à la betterave pour les conditions françaises. (Brisson *et al*, 2002). Quant au modèle SUCROS, il a été mis au point par l'université néerlandaise de Wageningen, et il a été adapté aux conditions françaises par l'INRA et l'ITB (Le betteravier, 2008). Cet outil est aussi utilisé par les techniciens de l'ITB pour suivre le développement de la culture du semis à la couverture du sol. Le logiciel Prévibet prend ensuite le relais pour donner un rendement prévisionnel dès le mois de juin. Le modèle SUCROS a été testé, calé et validé pour les conditions de stress hydrique. Launay *et al*,

(2003) ont testé les capacités du modèle à reproduire la variabilité spatiale des rendements de la betterave à l'échelle d'un bassin sucrier au nord de la France. Le modèle a été adapté pour la prise en compte de l'effet du stress hydrique sur la sénescence et l'allocation des assimilats. Il ressort de leurs résultats que les performances du modèle modifié étaient fortement liées à la précision à laquelle étaient renseignées les variables climatiques et les propriétés hydriques des sols.

La plupart de ces modèles sont des outils de recherche utilisés comme aide à la compréhension des processus ou de comparaison de scénarios. Ces modèles "sur-paramétrés" résultent de la juxtaposition de différents modèles développés par plusieurs spécialistes les rendant souvent difficile à caler et à valider. Ces modèles intégrant plusieurs paramètres restent souvent difficiles à caler et ne contiennent de compartiment tenant compte de la mortalité des graines et des plantules par submersion..

### **III.3.3. Définition de l'objet à modéliser et choix du modèle**

L'objet à modéliser porte sur une parcelle agricole cultivée en betterave à sucre non nivelée sans raies mais drainée par des tuyaux enterrés. Cette parcelle affiche une topographie irrégulière et présente un certain nombre de points hauts et de dépressions. Les sols étant argileux lourds, les dépressions accumulent de l'eau durant la période hivernale ou sous irrigation. La parcelle en question connaît des engorgements hivernaux affectant le rendement de la betterave à sucre. Il apparaît que l'objet à modéliser est très complexe. Il n'est pas réaliste d'entreprendre une modélisation complètement mécaniste des processus de submersion sur une parcelle non planée telle que représentée à la Figure 7. Les zones basses où les plantes souffrent d'hydromorphie, recueillent l'eau des zones hautes où les conditions de développement sont plus favorables.

Le modèle de culture PILOTE est ici adapté à la culture de la betterave à sucre dans le Gharb afin prendre en compte la genèse des excès d'eau. On se propose de rendre compte de la submersion par l'introduction de nouvelles fonctionnalités et paramètres supplémentaires tels que  $\theta_s$  et  $K_s$  (infiltration retardée et contrôlée par la montée du niveau de la nappe) et l'introduction du module tenant compte de la mortalité des graines et des plantules établi en référence aux résultats expérimentaux.

### **III.3.4. Adaptation du modèle PILOTE à la simulation des durées de submersion et à leur impact sur la production (version PILSUM (annexe V))**

#### **III.3.4.1. Adaptations préconisées du modèle PILOTE**

La version initiale du modèle PILOTE est adaptée afin de simuler l'impact des durées de submersion sur la croissance du végétal, ici la betterave à sucre (Figure 51). Dans la version

origine, comme du reste dans la plupart des modèles de bilan hydrique fondés sur l'approche capacitive et fonctionnant au pas de temps journalier, le drainage s'effectue sur le pas de temps. Autrement dit, le réservoir concerné par l'excès d'eau, est ramené à la capacité au champ en fin de pas de temps. Cette hypothèse est valable pour la plus part des conditions de sols hormis les sols très argileux surtout lorsque ces derniers ont leur capacités de drainage limitées par des remontées intempestives de la nappe même lorsque le niveau de celle-ci est plus ou moins efficacement contrôlé par un système de drains. Ce phénomène peut être assez fréquent dans les conditions de la plaine du Gharb et il convient d'en tenir compte dans la modélisation du bilan hydrique.

Afin de générer des conditions de submersion nous devons non pas limiter la capacité supérieure d'une couche à  $\theta_{fc}$  (teneur en eau à la capacité au champ) mais à  $\theta_s$  (teneur en eau à saturation). La durée de submersion correspondra alors au temps nécessaire pour permettre l'évacuation d'une hauteur d'eau équivalente à  $h_{surf}(j) = R_1(j) - \theta_s \cdot P_{surf} \cdot 1000$ ,  $R_1(j)$ , étant le niveau d'eau dans le réservoir superficiel de PILOTE et  $P_{surf}$  sa profondeur maximale, fixée à 0.1 m. Afin d'alléger les notations nous confondrons la désignation d'un réservoir avec sont niveau de remplissage. Comme pour les deux réservoirs sous-jacents  $R_2$  et  $R_3$  ( $R_2$  : réservoir racinaire,  $R_3$  : réservoir de transition), une fonction de ressuyage ralentit le drainage  $D$  d'un réservoir selon la formulation de Raes (1982) :

$$D = K_s (\exp(\theta - \theta_{fc}) - 1) / \exp(\theta_s - \theta_{fc}) - 1 \quad \text{Equation 39}$$

, qui offre l'avantage de n'introduire qu'un seul paramètre supplémentaire  $K_s$ . Le drainage  $d_3(j)$  de  $R_3$  alimente un 4<sup>ième</sup> réservoir dont le niveau  $h_n$  représente celui de la nappe :

$$h_n(j) = h_n(j-1) + d_3(j) - Q_d(j) \quad \text{Equation 40}$$

Il est contrôlé par le débit des drains selon une loi de vidange de type quadratique

$$Q_d(j-1) = h^2 / (h+x) \quad \text{Equation 41}$$

Celle-ci résulte de l'intégration sur le pas de temps de l'équation différentielle :

$$\frac{dh_d}{dt} + ch_d^2 = 0$$

**Equation 42**

, dans laquelle on a adopté, pour simplifier, une formulation proche de celle de Hooghoudt du débit de drainage instantané :

$$q_d = C_d \cdot h_d^2$$

**Equation 43**

, où  $C_d$  étant un paramètre de calage et  $h$  la charge au dessus des drains :  $h_d = h_n - Z_d$ ,  $Z_d$  étant la cote moyenne des drains. Dans l'équation 41,  $x$  est un paramètre fonction du pas de temps et du coefficient  $C_d$ .

En désignant  $Seu_{ild} = h_n - P_x$  ( $P_x$  : profondeur maximale racinaire : base du réservoir  $R_3$ ), on considère que cette grandeur régit la vitesse de ressuyage du sol. En effet lorsque le niveau de la nappe est en deçà d'un niveau correspondant à la base du réservoir racinaire, il existe du drainage libre. Cela signifie que le drainage  $d_3$  est sous le contrôle des caractéristiques hydrodynamiques des couches qui constituent les 3 réservoirs  $R_1, R_2, R_3$  (Figure 44). Lorsque le niveau de la nappe interfère avec celui du système racinaire, le drainage des couches supérieures est contrôlé par celui de la nappe  $Q_d$ . On a donc :

Si  $d_3 > Q_d$  alors on calcule la quantité qui ne peut s'échapper de  $R_3$  et qui peut le conduire à saturation :  $dr_3 = \max[0, (d_3 - Q_d)]$

$d_3$  ne peut donc être qu'égal à  $Q_d$  et  $R_3 = R_{3+} + dr_3$  et on borne alors  $R_3$  à  $\theta_s (P_x - Z_{root}) \cdot 1000$ .

On procède de même pour  $R_2$  et  $R_1$  le calcul de  $dr_1$  qui conduit  $R_1(j) = R_1(j-1) + dr_1$  permet de calculer le ruissellement ou l'excès d'eau potentiel du jour  $J$  :

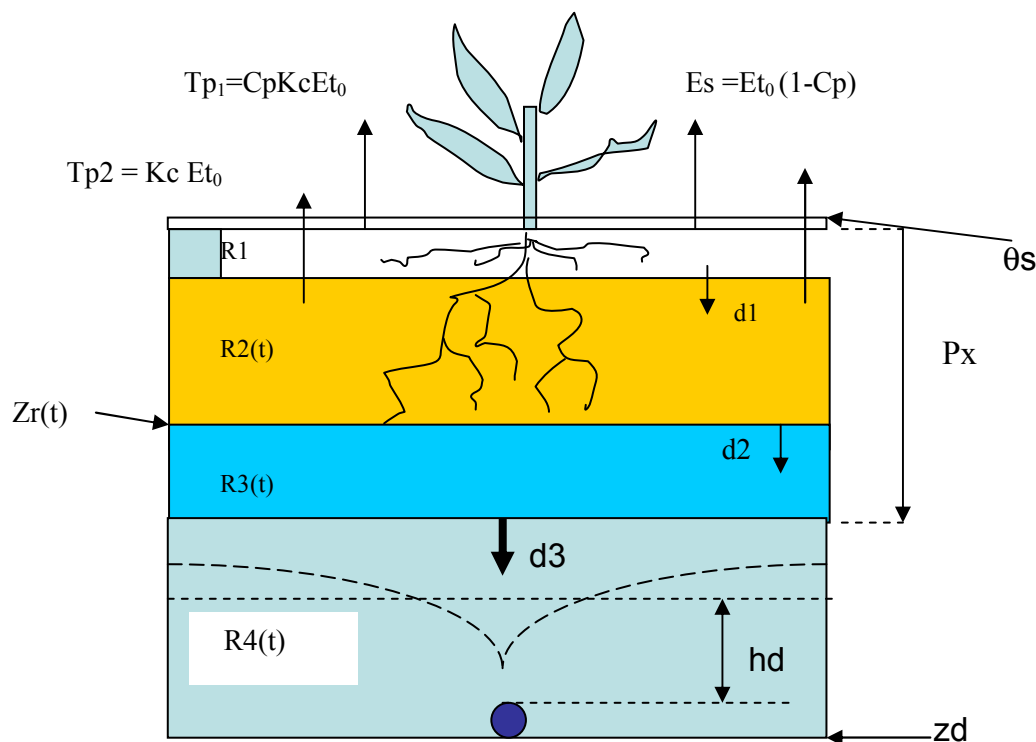
$$R_{uis} = R_1 - \theta_s P_{surf} 1000.$$

Deux possibilités s'offrent à nous pour générer de l'excès d'eau à la surface du sol :

- 1- selon un processus hortonien : il suffit pour cela d'adopter pour  $K_s$  une valeur suffisamment faible, très inférieur à 0.2 cm/h valeur obtenue dans le modèle de ruissellement.
- 2- Selon un processus de Dunes, on a dans ce cas intérêt à adopter la valeur de  $K_s$  identifiée dans le modèle ruissellement afin que l'infiltration ainsi générée

recharge la nappe. Cependant, afin que son niveau s'élève au point de s'opposer au drainage des couches supérieures du sol en générant ainsi de l'excès d'eau en surface, il convient de réduire le débit des drains en intervenant sur le coefficient C.

L'une ou l'autre de ces deux approches, utilisables pour générer de l'excès d'eau n'a pas de lien avec une quelconque réalité. En effet, la première nous contraint à adopter une valeur de  $K_s$  très éloignée de sa valeur réelle, la deuxième à simuler des débits drainés considérablement plus faibles que ceux mesurés. Il faut en convenir, générer de l'excès d'eau sur une parcelle telle que la parcelle non nivelée P2 ne peut s'envisager de façon opérationnelle qu'en faisant référence à une parcelle virtuelle. Il paraît en effet difficilement concevable d'entreprendre la modélisation du remplissage de l'ensemble dépression recueillant l'eau des parties hautes par ressuyage.



**Figure 51.** Représentation schématique du module sol de la version adaptée de PILOTE à la submersion

#### a) Impact des durées de submersion sur le rendement

Sur la base des essais expérimentaux conduits dans des pots, où l'on contrôlait la durée de submersion et où l'on notait les conséquences sur la mortalité des graines puis des plantules, des relations empiriques ont été établies. Elles permettent de définir un coefficient de mortalité

en fonction des durées de submersion affectant respectivement graines puis plantules. L'algorithme de calcul suivant, établit ces coefficients de mortalité  $C_m$  en assurant la continuité temporelle entre les deux processus, celui propre aux graines et celui propre aux plantules.

#### **a.1) Cas des graines**

Les formules gérant la mortalité sont régies par des seuils de température. Depuis le semis un cumul de température  $SomT$  définit le choix de la formulation adoptée. Si  $SomT \leq T_{sg}$  on adopte alors la formule relative aux graines :

$$C_m = 1 - p_g(1 - \exp(-r_g(nj_g - nx_g))) \quad \text{Equation 44}$$

Où  $p_g$  et  $r_g$  sont des paramètres de calage  $nj_g$  le nombre de jours de submersion après semis calculés par le modèle (quand  $h_{surf} > 0$ ) et  $nx_g$  la durée maximale de tolérance à la submersion pour les graines. Au delà de cette durée apparaissent les premiers cas de mortalité. Expérimentalement (cf chapitre II) on a trouvé  $nx_g = 3$  jours. On corrige alors la densité initiale  $Densini$  pour obtenir la densité réelle :

$$Densr = C_m \cdot densini \quad \text{Equation 45}$$

On adapte ensuite la valeur du  $LA_{Imax}$  correspondant à  $Densini$  par la relation l :

$$R_{laix} = R_{laimax} \cdot C_{ordens} \quad \text{Equation 46}$$

$$, \text{ avec } C_{ordens} = (Densr/Densini)^{0.4} \quad \text{Equation 47}$$

Le coefficient 0.4 résulte d'un calage effectué sur d'autres cultures comme le maïs ou le blé, pour lesquelles une relation a pu être établie entre  $LA_{Imax}$  et la densité de plantation (Khaledian *et al.*, 2008).

#### **a2) Cas des plantules**

Lorsque  $SomT > T_{sg}$  on adopte la formulation relative aux plantules. Dans le cas où la submersion se prolonge au-delà de la période impartie aux graines, la densité initiale affectée aux plantules n'est autre que la densité réelle à l'issue de la période "graine". Dans le cas contraire la densité initiale pour la période plantule est celle correspondante à la plantation.

Une formulation de mortalité équivalente est adoptée pour les plantules, seules les valeurs des paramètres changent :

$$C_m = 1 - p_p(1 - \exp(-r_p(np_g - nx_p))) \quad \text{Equation 48}$$

Les paramètres de cette formulation ont la même signification que ceux de la formulation précédente,  $np_g$  étant la durée de submersion calculée dès le début de la période impartie aux plantules,  $nx_p$  étant la durée de tolérance maximale avant l'apparition des premiers cas de mortalité plantule. On a trouvé expérimentalement que  $nx_p = 3 nx_g$ . La mortalité plantule entraîne une diminution de la densité de plantation qui affecte comme précédemment le LAI max.

La chute de LAI conduit à une perte de rendement selon les mêmes concepts propres au modèle PILOTE. On a également tenu compte du fait que durant la submersion la plante qui subsiste encore ne transpire pas. Cette limitation de la transpiration est adoptée dans la formulation de Feddes *et al.*, (1978) qui définit un seuil de potentiel hydrique du sol au-delà duquel la plante est en état de stress par excès d'eau.

#### III.3.4.2. Simulation des excès d'eau sur une parcelle non planée virtuelle (Type non nivelée irriguée en aspersion) et impact sur le rendement

Comme évoqué précédemment, il n'est pas réaliste d'entreprendre une modélisation complètement mécaniste des processus de submersion sur une parcelle non planée telle que représentée à la **Figure 7**. Les zones basses où les plantes souffrent d'hydromorphie, recueillent l'eau des zones hautes où les conditions de développement sont plus favorables. L'option de modélisation adoptée repose sur une approche conceptuelle qui consiste à considérer une parcelle virtuelle où les mécanismes de submersion locaux seraient traités selon une approche globale. Pour cela nous avons proposé deux options. La première consisterait à générer la submersion selon un processus hortonien en réduisant  $K_s$ , la deuxième selon un processus de Dune en réduisant le coefficient de la loi de vidange des drains. L'approche de Dune donnant lieu à des valeurs de débits de drainage peu réalistes car excessivement faibles, nous avons retenu l'approche hortonienne. La valeur de  $K_s$  obtenue n'en est pas moins irréaliste  $K_s = 5 \text{ mm/j}$ , valeur excessivement faible (de l'ordre d'une dizaine de fois inférieure à la valeur calée dans le modèle de ruissellement ou pour le modèle d'irrigation à la raie), mais l'option retenue nous paraît plus en accord avec le caractère virtuel conféré à la parcelle.

Nous convenons donc de jouer sur la valeur de  $K_s$  pour réduire la vitesse de drainage des couches du sol selon la formulation de Raes (1982). Au moyen des simulations PILOTE nous

ajustons  $K_s$  selon l'approche classique essais erreur de sorte que le rendement simulé sur P2 en 2005 soit aussi proche que possible du rendement mesuré : 55 T/ha. Nous avons ensuite cherché à valider ce calage sur 2006. Nous avons obtenu 56 T/ha simulés contre 57 T/ha mesurés. Mais il apparaît que la baisse de rendement pour la saison 2004-2005, telle que la simule PILOTE soit également due à un déficit hydrique continu du 14/4 au 6/5/2005. L'excès d'eau simulé selon le modèle sur la période du 4/12 au 13/12/2005 et du 20/1 au 23/1/2006 affecterait à la fois le stade graine et plantule, le semis ayant eu lieu le 26 novembre 2004. L'étude de sensibilité ( $\Delta K_s/K_s \pm 250\%$ ) relative à ce paramètre  $K_s$  donne pour valeur de SI : + 0.15 pour  $\Delta K_s/K_s + 50\%$  et SI = -0.28 pour  $\Delta K_s/K_s - 50\%$  respectivement, ce qui témoigne d'une sensibilité peu élevée de ce paramètre au rendement dans le type de modélisation adoptée sur le scénario 2004-2005. Cependant, cet indice de sensibilité peut varier considérablement d'un scénario climatique à un autre. Il est égal à 1.5 et à -1.4 respectivement sur le scénario 2005-2006. Selon la distribution temporelle des épisodes pluvieux hivernaux et leur intensité, une variation même peu élevée de ce paramètre peut générer intempestivement un scénario de type "tout (1) ou rien (0)". En conséquence, un nombre plus conséquent d'années d'observations serait nécessaire pour se faire une idée de la valeur moyenne de cet indice.

#### **III.3.4.3. Test de la version PILSUM sur le cas d'une parcelle drainée en surface (raies) et en profondeur (drains)**

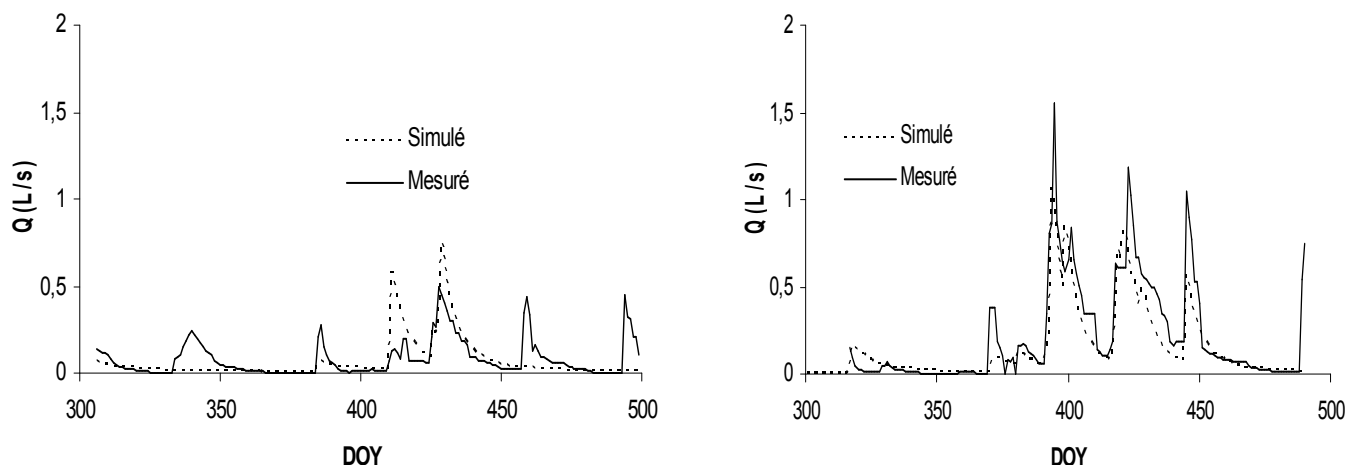
La version PILSUM est testée dans ce paragraphe au regard de son aptitude à simuler le drainage journalier. Le paramètre  $K_s$  est fixé à la valeur adoptée pour le modèle ruissellement soit de l'ordre de 50 mm/j. Cette valeur n'induit pas de différence de simulation du bilan hydrique entre les deux versions de PILOTE car elle permet au sol de retrouver sa teneur à la capacité au champ en fin de pas de temps. Le paramètre  $C_d$  contrôlant le débit des drains est calé sur la saison 2005-2006, saison relativement pluvieuse comparée à celle de 2004-2005. La parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement n'a subi qu'un seul arrosage lors de la saison 2005-2006,. Ce dernier n'était du reste pas forcément nécessaire étant donné d'une part le caractère tardif de sa date (fin de cycle) et d'autre part le niveau d'humidité moyen du sol juste avant sa mise en œuvre ( $\theta_i = 0.32$ ).

La valeur  $C_d = 0.27$  donne lieu à une simulation assez satisfaisante du débit journalier au regard du graphe de la Figure 52b. En revanche la validation (Figure 52a) sur la saison 2004-2005, l'est beaucoup moins. Le fait de constater que les drains réagissent sitôt l'irrigation gravitaire mise en œuvre nous conduit à penser qu'un transfert rapide en direction des drains

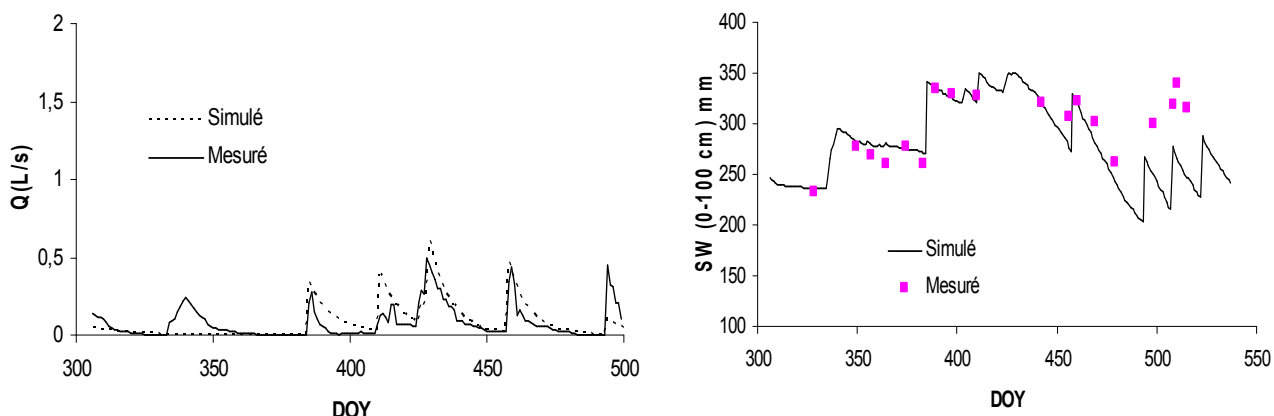
s'effectue par le biais d'une forme de macro-porosité. Nous l'attribuons à l'effet de la fissuration dont l'importance s'accroît avec le déficit de saturation (Mailhol *et al.*, 1999). Afin de rendre compte de ce phénomène nous avons donné la possibilité au modèle de simuler de deux porosités. Pour faire simple, on considère que le jour où l'on irrigue, la réserve utile initialement affichée pour le sol considéré est subitement réduite. Ce niveau de réduction  $C_{ru}$  est directement fonction du niveau d'humidité initial du sol avant le déclenchement de l'arrosage selon la relation :

$$C_{ru} = a\theta_i \quad \text{Equation 49}$$

Le paramètre  $a$  de cette relation a été calé sur la saison 2004-2005. La valeur de  $C_{ru}$  est bornée à 1 supérieurement et à 0.5 inférieurement. La valeur  $a = 5$  donne lieu à une simulation assez satisfaisante du drainage au regard de la Figure 53a. On constate qu'en effet un drainage est simulé lors des trois derniers arrosages contrairement à la situation où l'on ne prend pas en compte la double porosité. Cependant on constate que la simulation du bilan hydrique s'est dégradée lorsque l'on compare la Figure 53b à la Figure 52 et ce à partir des trois derniers arrosages intervenant pour des niveaux de déficit hydriques importants. Ce genre de résultat soulève deux questions. La première concerne la représentativité d'un bilan local relatif à quelques mètres carrés. La deuxième est relative à l'origine de la réponse des drains à l'irrigation étant donné que le réservoir sol peut stocker la quasi-totalité de la dose apportée lors de l'arrosage. C'est selon cette hypothèse là que l'on simule correctement le bilan hydrique et discrédite quelque peu à la prise en compte de la double porosité. Si l'on accepte le fait de la bonne représentativité du bilan hydrique vis-à-vis des transferts d'eau à l'échelle de la parcelle, Il faut alors trouver une explication à la réaction soudaine des drains à l'irrigation. Certains travaux ont avancé le fait que les tranchées relatives à la mise en place des drains pouvaient être responsables de la rapide réaction des drains. (Lesaffre, 1988), Zimmer(1988), Zimmer (2001) et Hammani (2002). En fait, la tranchée est plus perméable que le sol en place suite au remaniement du sol opéré par la draineuse. Dans le cas présent il est difficile de pencher en faveur de telle ou telle hypothèse. Une multiplication des sites d'évaluation du bilan hydrique est peut être susceptible de nous éclairer sur des aspects de la modélisation conceptuelle ici proposée.



**Figure 52.** Simulation du drainage saison 2004-2005 (a : validation) et saison 2005-2006 (b : calibration)



**Figure 53.** Simulation du drainage en 2004-2005 (a) et du bilan hydrique sur P3 (b) résultant de la simulation d'une double porosité

### III.3.5. Conclusion

On rappelle ici que l'objectif est d'évaluer l'impact de la submersion sur la culture de betterave à sucre au niveau d'une parcelle non nivelée, avec la présence des dépressions et des points haut. Il n'est pas réaliste d'entreprendre une modélisation mécaniste des processus de submersion sur une parcelle non planée. Les zones basses où les plantes souffrent d'hydromorphie, recueillent l'eau des zones hautes où les conditions de développement sont plus favorables. Seule une approche spatialisée pourrait rendre compte réellement de ce qui se

passe dans cette parcelle. Cette approche reste lourde à conduire. Finalement, l'option de modélisation retenue repose sur une approche conceptuelle qui consiste à considérer une parcelle virtuelle où les mécanismes de submersion locaux seraient traités selon une approche globale. Le modèle de culture PILOTE dont les paramètres sont plus accessibles, limités en nombre et donc faciles à caler a été adapté pour prendre en compte la genèse des excès d'eau. Il est bien entendu que son adaptation à la betterave à sucre dans la plaine du Gharb a été faite auparavant (paragraphe III.2). Le modèle rend compte de la submersion par l'introduction de nouvelles fonctionnalités et paramètres supplémentaires tels que la teneur en eau à saturation  $\theta_s$  et la conductivité à saturation.  $K_s$  (infiltration retardée et contrôlée par la montée du niveau de la nappe) et l'introduction du module tenant compte de la mortalité des graines et des plantules établi en référence aux résultats expérimentaux.

Deux options ont été proposées. La première consisterait à générer la submersion selon un processus hortonien en réduisant  $K_s$ , la deuxième selon un processus de Dune en réduisant le coefficient de la loi de vidange des drains. L'approche de Dune donnant lieu à des valeurs de débits de drainage peu réalistes car excessivement faibles, l'approche hortonienne a été retenue. Au moyen des simulations avec PILOTE, des ajustements de  $K_s$  ont été réalisés selon l'approche classique essais erreur de sorte que le rendement simulé sur la parcelle non nivelée irriguée en aspersion P2 en 2005 soit aussi proche que possible du rendement mesuré : 55 T/ha. Ensuite ce calage a été validé sur 2006. Le rendement obtenu par simulation de 56 T/ha contre 57 T/ha mesurés. Mais il apparaît que la baisse de rendement pour la saison 2004-2005, telle que la simule PILOTE soit également due à un déficit hydrique continu du 14/4 au 6/5/2005. L'excès d'eau simulé selon le modèle sur la période du 4/12 au 13/12/2005 et du 20/1 au 23/1/2006 affecterait à la fois le stade graine et plantule, le semis ayant eu lieu le 26 novembre 2004. Concernant la saison 2003-2004, le modèle surestime (63 Vs 59 T/ha) quelque peu le rendement, mais la présence des souches de cannes de la saison précédente peut expliquer cet état de fait.

La version PILUSM a été testée sur le cas d'une parcelle drainée en surface (raies) et en profondeur (drains) eu regard de son aptitude à simuler le drainage journalier. Le paramètre  $K_s$  est fixé à la valeur adoptée pour le modèle ruissellement soit de l'ordre de 50 mm/j. Le paramètre  $C$  contrôlant le débit des drains est calé sur la saison 2005-2006, relativement pluvieuse comparée à celle de 2004-2005. La valeur de  $C = 27$  a donné lieu à une simulation assez satisfaisante du débit journalier pour la campagne 2005/06. En revanche la validation sur la saison 2004-2005, l'est beaucoup moins. Le fait de constater que les drains réagissent sitôt l'irrigation gravitaire mise en œuvre conduit à penser qu'un transfert rapide en direction

des drains s'effectue par le biais d'une forme de macro-porosité. Ceci est attribué à l'effet de la fissuration dont l'importance s'accroît avec le déficit de saturation pour ce type de sol (Mailhol *et al.*, 1999).

La bonne simulation du bilan hydrique discrédite quelque peu la prise en compte de la double porosité. Certaines travaux ont avancé le fait que les tranchées relatives à la mise en place des drains pouvaient être responsables de la rapide réaction des drains (Lesaffre, 1988), Zimmer(1988), Zimmer(2001) et Hammani (2002). Il est difficile actuellement de se pencher en faveur de telle ou telle hypothèse.

## Chapitre IV. SIMULATION DE LA PRODUCTION

### IV.1. Introduction

L'eau est un des facteurs limitant la production agricole. Toutefois, son excès peut avoir des conséquences négatives et mettre en péril tous les efforts consentis par l'agriculteur ou la collectivité. Aussi, et si l'irrigation s'est imposée comme une voie incontournable pour le développement agricole, et delà a bénéficié d'une attention particulière des pouvoirs publics aussi bien en matière de la mise en place des aménagements que des opérations d'entretien qui leur sont accordées, les réseaux de drainage et d'assainissement sont relégués au deuxième rang de point de vue des priorités. Le drainage a fait l'objet de beaucoup de travaux sur le plan hydraulique et hydrologique mais rares sont les travaux qui se sont intéressés à l'évaluation agronomique de ces systèmes. Pendant très longtemps, la notion du drainage a été liée à l'évacuation des excès d'eau par des écoulements souterrains vers les tuyaux enterrés et toutes les méthodes de conception des systèmes de drainage ont été orientées dans ce sens. Peu d'importance a été accordée à l'évacuation de l'excès d'eau par le drainage de surface. Le périmètre du Gharb est l'une des régions betteravières les plus importantes du Maroc. Cependant les rendements obtenus n'ont varié que de 20T/ha (1962-1963) à 44 T/Ha au début des années 2000 (MADR, 2003). Ce rendement reste faible par rapport aux potentialités régionales et aux rendements obtenus dans d'autres régions du Maroc (Mossadeq *et al.*, 2004). Mzibra *et al.*, (2008) explique que l'une des contraintes majeures qui entraverait le développement de la betterave à sucre dans le Gharb est la coïncidence des dates de semis tardives avec les fortes précipitations causant des stagnations d'eau dans les parcelles de betteraves voire même des inondations qui peuvent être à l'origine des pertes de plantules.

Les dates de semis adoptés dans le Gharb selon Bousraref (1999) sont comme suit :

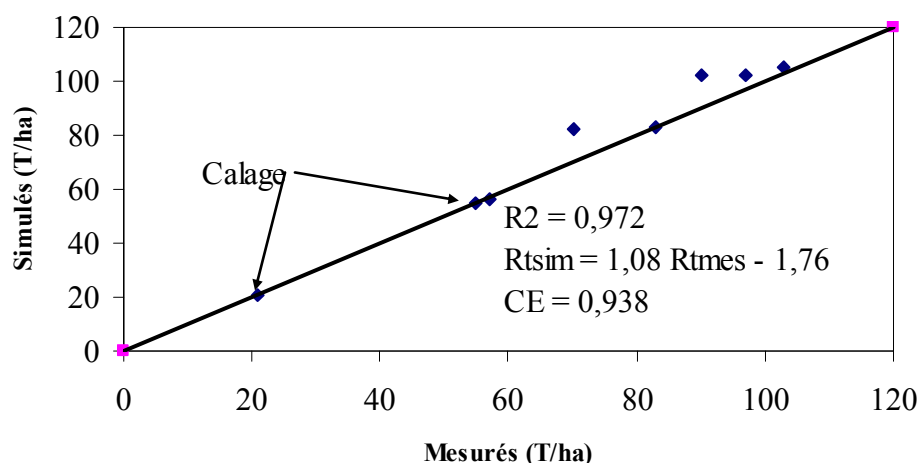
- Semis d'octobre : 15%
- Semis de novembre : 62%
- Semis de décembre-janvier : 23%

De ce fait, il est intéressant d'analyser les variations des rendements en fonction des précipitations sur des parcelles présentant des façonnages de surface différents (parcelle planée dotée de raies irriguée gravitairement et parcelle non nivelée irriguée par aspersion) en prenant en compte différents dates de semis inspirés de ceux adoptés généralement dans le périmètre du Gharb. L'objet du présent chapitre est de procéder à des simulations des

rendements en fonction des dates de semis (précoce, saison et tardif) sur la série de données complètes disponibles au niveau du site expérimentale de Souk Tlet pour une parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement et une parcelle non nivelée irriguée par aspersion, et de déterminer la valorisation de l'eau pour la parcelle qui présentera les meilleurs rendements.

## IV.2. Simulation des rendements

La Figure 54 récapitule les résultats relatifs aux rendements simulés avec les modèles adaptés. Les points concernés par le calage sont celui du traitement sec sur parcelle nivelée dotée de raies en 2005 (21 T/ha) et celui de la parcelle non nivelée irriguée par aspersion (55 T/ha). On peut dire que globalement les modèles (SOFIP et PILOTE) simulent de façon acceptable les rendements. Ce constat nous autorise à réaliser des simulations sur la série chronologique des années disponibles (1995-2006) à la SEHA de Souk-Tlet.



**Figure 54.** Simulation des rendements des deux campagnes 2004-2005 et 2005-2006.

Afin d'analyser l'intérêt de la pratique de l'irrigation à la raie modernisée (parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement) vis-à-vis d'une parcelle non planée irriguée en aspersion, des simulations ont été réalisées. Pour la parcelle non nivelée irriguée en aspersion comme pour la parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement, la stratégie testée consiste à déclencher l'irrigation lorsque la réserve du sol (sur  $Z = P_x$ ) est épuisée à 60% ce qui correspond approximativement au seuil d'épuisement de la réserve utile (conditions non restrictives). La période d'irrigation démarre au semis et prend fin une dizaine de jours environ avant la maturité. Les doses moyennes adoptées pour l'aspersion sont de 35 mm. Pour le gravitaire, elles sont calculées sur la base de la pratique améliorée du Tableau 11. Le temps de coupure de l'alimentation en tête lequel est fixé à  $1.1TL$ ,  $TL$  étant le temps d'avancement

de la raie médiane. Pour la parcelle nivelée dotée de raies de 230 m de long les doses brutes d'irrigation oscillent entre 90 et 110 mm avec des efficacités d'application proches de 90% (Tableau 12). Seule la valeur moyenne du rendement est affichée, le CV étant de l'ordre de 5%, selon les résultats de la pratique améliorée simulée par le modèle SOFIP.

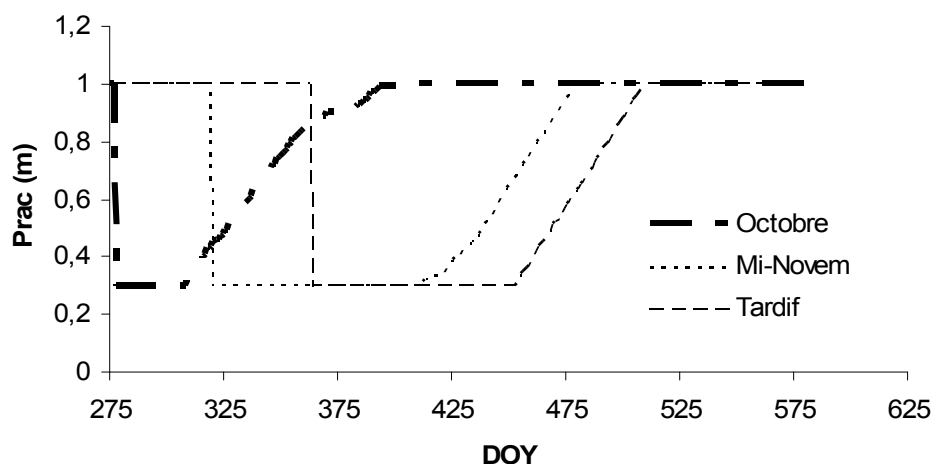
Différentes dates de semis ont été testées afin de rendre compte de l'effet éventuel de ces dates sur les risques de submersion et le rendement (durée du cycle). Un exemple d'impact des dates de semis sur la progression racinaire est donné à la Figure 55. Pour le cas de la saison 2004-2005 et pour une parcelle non sujette aux excès d'eau, on met bien en évidence l'effet de la thermique, un semis d'octobre permettant d'exploiter les potentialités hydriques du sol relativement tôt dans la saison.

Les avantages du gravitaire modernisé par rapport à l'aspersion sont indéniables (Figure 56). Ce constat avait du reste été fait sur la SEHA de Souk Tlet pour le cas de la canne à sucre mais pour des raisons liées à l'hétérogénéité des apports par aspersion. Au regard du Tableau 12 il apparaît que les semis précoces (début octobre) engendrent un déficit de rendement de l'ordre de 10 T/ha en moyenne par rapport aux semis de mi novembre. Ces derniers donnent lieu aux meilleurs rendements pour plusieurs raisons : une durée de cycle avec des journées plus ensoleillées, des valeurs de températures plus basses en fin de cycle que pour un semis tardif. On constate que les années pluvieuses (à faible ensoleillement) sont davantage préjudiciables aux semis précoces. Par exemple pour la saison 1995-1996, la hauteur de pluie sur le cycle dépasse les 700 mm. A noter cependant que selon le modèle, c'est un semis précoce qui a engendré le rendement le plus élevé. Mais il s'agit d'un fait occasionnel et une simulation sur une série beaucoup plus longue permettrait de renforcer ces différents constats. Il convient de noter que la variabilité inter annuelle est assez élevée pour un semis précoce (17%). En outre, les rendements des cinq premières années sont faibles en raison d'un déficit d'ensoleillement sur une période où le LAI est plus élevé que pour les semis plus tardifs. Les ETR de ces années là sont bien en deçà de 300 mm, alors qu'elles dépassent largement les 350 mm pour ces mêmes années pour les semis plus tardifs.

Concernant les parcelles sujettes aux submersions (Tableau 3), celles ci affectent fortement les plantules dans le cas des semis précoces. La plupart des semis tardifs ne peuvent être réalisés en raison de conditions d'impraticabilité des parcelles (\*). Des reports de dates de semis ne sont guère réalistes au-delà de la première décade de février en raison des valeurs élevées des températures en fin de cycle. Même lorsque le semis est possible, les rendements sont plus faibles que celui de mi-novembre en raison d'une durée moyenne du cycle plus courte (187 jours). La durée d'ensoleillement ne compense pas le raccourcissement de la

durée du cycle et les températures élevées des quelques semaines qui précèdent la maturité affectent également le rendement. Pour la saison 2003-2004 par exemple, le semis n'est possible qu'à partir de début février 2004 (le 02/02) sur ce type de parcelles et le rendement n'atteint que 82 T/ha.

Selon nos simulations (Tableau 13 et Figure 56b), la submersion affecterait la production quasiment une année sur deux voire davantage, les semis tardifs étant les plus vulnérables. Cela résulte du fait que ces submersions ont tendance à se produire courant décembre (Tableau 13 : dernière colonne/ au semis du 15/11), n'affectant ainsi que les plantules dans le cas d'un semis précoce. Notons que graines et plantules subissent à tour de rôle les méfaits de la submersion lorsque le semis peut être effectué juste avant une occurrence de submersion. Les semis de mi novembre affichent les risques de pertes les plus faibles de rendement. Cependant, même dans ces conditions, la variabilité inter annuelle demeure très forte.



**Figure 55.** Impact des dates de semis sur la croissance racinaire (cas de la saison 2004-2005)

**Tableau 12.** Rendements moyens (T/ha) sur parcelle nivelée irriguée en gravitaire simulés selon SOFIP (conduite non restrictive) sur une chronique de 11 années au Gharb pour trois dates de semis différentes.

| Années  | Précoce : 4/10 | Nj Mat | Saison<br>Mi-Nov | Nj Mat | Tardif : 30/12 | Nj Mat |
|---------|----------------|--------|------------------|--------|----------------|--------|
| 1996    | 74             | 195    | 97*              | 203    | 99*            | 181    |
| 1997    | 66             | 184    | 82               | 188    | 89             | 169    |
| 1998    | 72             | 191    | 89               | 200    | 90             | 178    |
| 1999    | 98             | 225    | 101              | 223    | 97             | 195    |
| 2000    | 87             | 212    | 104              | 210    | 101            | 188    |
| 2001    | 85             | 188    | 107              | 197    | 107            | 176    |
| 2002    | 81             | 189    | 103              | 197    | 104            | 180    |
| 2003    | 88             | 198    | 102              | 196    | 91             | 175    |
| 2004    | 95             | 214    | 110              | 212    | 108            | 187    |
| 2005    | 118            | 226    | 113              | 217    | 98             | 193    |
| 2006    | 106            | 220    | 104              | 210    | 95             | 187    |
| M et Cv | 88 (17%)       | 204    | 101 (8%)         | 205    | 98 (6%)        | 183    |

**Nj Mat = nombre de jours nécessaires pour atteindre la maturité physiologique,**

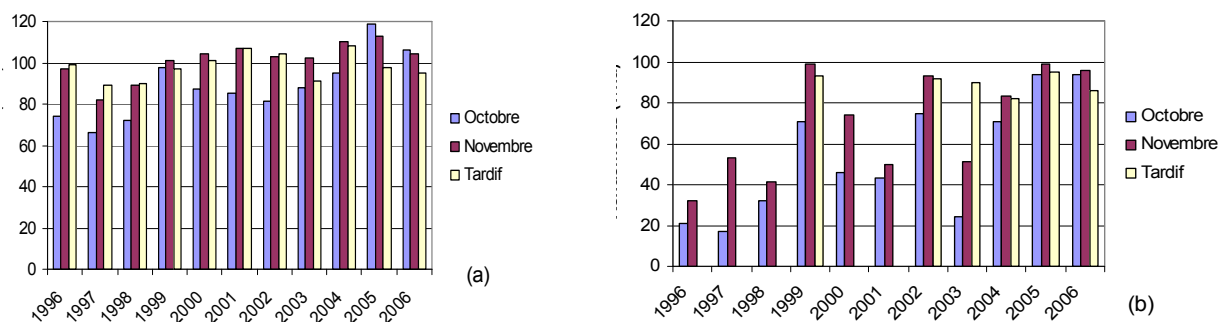
**(\*) : Risque de report de dates de semis.**

**Tableau 13.** Rendements (T/ha) sur parcelle non nivelée irriguée en aspersion simulés en parcelle non planée sur une chronique de 11 années au Gharb pour trois dates de semis différentes.

| Années  | Précoce  | Saison   | Tardif     | Submersion : J1-J2 **       |
|---------|----------|----------|------------|-----------------------------|
| 1996    | 21       | 32       | *          | 15/12-20/03 ; 10/5-16/5     |
| 1997    | 17       | 53       | *          | 01/12-24/2                  |
| 1998    | 32       | 41       | *          | 04/12-24/2                  |
| 1999    | 71       | 99       | 93         | 31/12-3/1 ; 23/01-28/1      |
| 2000    | 46       | 74       | *          | 4/12-19/1                   |
| 2001    | 43       | 50       | *          | 29/12-3/3                   |
| 2002    | 75       | 93       | 92         | 25/12-26/12                 |
| 2003    | 24       | 51       | 90 (2/2)   | 17/11-12/1                  |
| 2004    | 71       | 83       | 32 (28/01) | 16/11 - 24/11 ; 6/12-31/12  |
| 2005    | 94       | 99       | 95         | 5/12-15/12 ; 2/3-6/3        |
| 2006    | 94       | 96       | 86         | 1/-9/2 ; 25/2-8/3 ; 22-25/3 |
| M et Cv | 53 (51%) | 70 (34%) | -          |                             |

(\*) : L'éventuel report de la date de semis n'est pas réaliste : pas de production possible,

(\*\*) J1 : jour début de submersion et J2 : Jour fin de la submersion



**Figure 56.** Rendements simulés (a) et en parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement (b) et en parcelle non nivelée irriguée en aspersion

#### IV.3. Valorisation de l'eau d'irrigation

Sous l'hypothèse que le gravitaire modernisé soit la solution adoptée pour l'irrigation de la betterave à sucre confortée par ce qui précède, nous analysons ici l'intérêt de l'irrigation appliquée à une parcelle ayant les mêmes caractéristiques que la parcelle nivelée dotée de raies. On a vu que dans ces conditions les doses moyennes appliquées sont de l'ordre de 100 mm par arrosage. Un apport d'eau peut être réalisé dès le semis, notamment pour les semis

précoces. Ces simulations ont donné lieu au Tableau 12. Le Tableau 14 présente les résultats des simulations opérées selon les trois dates de semis. Ils permettent le calcul de l'efficacité agronomique de l'eau d'irrigation (WUE : Water Use Efficiency) définie par le ratio du gain de rendement résultant de l'irrigation sur la dose apportée. Les rendements en sec ont donc été simulés. Pour le calcul des WUE moyennes nous n'avons tenu compte que des années où il y eu irrigation. En fait seule la saison 95-96 ne nécessitait pas l'irrigation, mais compte tenu de la pluviométrie hivernale exceptionnelle, il est fort probable que même en gravitaire modernisé les semis n'aient pas été possibles. Au regard du on constate que les WUE moyennes pour les semis précoces et tardifs sont les mêmes. Elles sont très inférieures à celle du semis de mi novembre. Le semis tardif est largement en tête en termes de consommation d'eau. Les gains de rendement totaux sont plus élevés pour le semis tardifs mais ceux-ci requièrent beaucoup plus d'eau. Un semis précoce nécessite plus fréquemment un arrosage dès le semis et un semis tardif est plus exposé aux sécheresses de fin de cycle. Cela explique les apports importants pour les semis tardifs.

**Tableau 14.** Analyse de la productivité de l'eau en gravitaire modernisé

| Années | Semis Précoce (4/10) |                    |                   | Semis de saison<br>15 Novembre |                    |                   | Semis Tardif (30/12) |                    |                   |
|--------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
|        | $\Delta R$           | Dose               | WUE               | $\Delta R$                     | Dose               | WUE               | $\Delta R$           | Dose               | WUE               |
|        | T/ha                 | M <sup>3</sup> /ha | Kg/M <sup>3</sup> | T/ha                           | M <sup>3</sup> /ha | Kg/M <sup>3</sup> | T/ha                 | M <sup>3</sup> /ha | Kg/M <sup>3</sup> |
| 1996   | 20                   | 2000               | 10                | 0                              | 0                  | -                 | 0                    | 0                  | -                 |
| 1997   | 16                   | 2000               | 8                 | 26                             | 2000               | 13                | 42                   | 4000               | 10.5              |
| 1998   | 18                   | 2000               | 9                 | 26                             | 1000               | 26                | 34                   | 3000               | 11                |
| 1999   | 31                   | 3000               | 10                | 57                             | 3000               | 19                | 67                   | 3000               | 22                |
| 2000   | 23                   | 2000               | 11.5              | 23                             | 2000               | 11.5              | 30                   | 4000               | 7.5               |
| 2001   | 24                   | 2000               | 12                | 17                             | 3000               | 6                 | 64                   | 4000               | 16                |
| 2002   | 56                   | 3000               | 18.6              | 48                             | 3000               | 16                | 55                   | 4000               | 14                |
| 2003   | 22                   | 2000               | 11                | 14                             | 1000               | 14                | 20                   | 3000               | 7                 |
| 2004   | 23                   | 1000               | 23                | 14                             | 1000               | 14                | 1                    | 1000               | 1                 |
| 2005   | 65                   | 5000               | 11                | 103                            | 6000               | 17                | 92                   | 7000               | 14                |
| 2006   | 33                   | 3000               | 11                | 43                             | 3000               | 14                | 65                   | 4000               | 16                |
| WUEm   |                      |                    | 9.5               |                                |                    | 13.9              |                      |                    | 9.6               |

$\Delta R$  : accroissement de rendement par rapport au non irrigué,

WUE : efficacité d'utilisation de l'eau,

Nb : les doses moyennes par arrosage ont été arrondies.

#### IV.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de regrouper l'ensemble des résultats relatifs à la simulation de la production obtenus dans les différents contextes de parcelle et de mode d'irrigation. Dans l'ensemble, les différents modèles mis en œuvre permettent de simuler de façon acceptable les rendements mesurés de la betterave à sucre sur trois campagnes (2003 à 2006) au Gharb. Ce résultat encourageant nous a conduit à effectuer une simulation sur une série climatique de onze années disponibles au niveau du site expérimental de Souk Tlet. Cette simulation fait apparaître de façon nette, les avantages de la technique de la raie longue modernisée vis-à-vis d'une parcelle non nivelée conduite en aspersion et ce, quelque soit les dates de semis ont été également adoptées. Les semis de novembre présentent les meilleurs rendements en raison des durées de cycles plus élevées (on cumule davantage de rayonnement), et des valeurs de température plus basses que pour les semis tardifs. Les années pluvieuses, à faible ensoleillement, sont préjudiciables aux semis précoces. Concernant la parcelle non nivelée irriguée en aspersion, les submersions, selon le modèle, affecteraient les plantules pour le semis précoce. Les semis tardif ne peuvent être réalisés pour des raisons d'impraticabilité des parcelles. Le report des dates de semis ne peut dépasser en fait la première semaine de février en raison des chaleurs estivales qui pénalisent la croissance de la betterave. Les semis de novembre affichent les meilleurs rendements.

Concernant la valorisation de l'eau pour la parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement, le semis de novembre présente la plus forte efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) par rapport aux semis précoce et tardif qui affichent la même valorisation. Un semis précoce nécessite plus fréquemment un arrosage dès le semis et un semis tardif est plus exposé aux sécheresses de fin de cycle.

## Chapitre V. CONCLUSION GENERALE

Pendant très longtemps, la notion du drainage a été liée à l'évacuation des excès d'eau par des écoulements souterrains vers les tuyaux enterrés et toutes les méthodes de conception des systèmes de drainage ont été orientées dans ce sens. Le drainage a fait l'objet de nombreux travaux sur le plan hydraulique et hydrologique mais rares sont les travaux qui se sont intéressés à l'évaluation agronomique de ces systèmes. Peu d'importance a été accordée au drainage de surface (ruissellement). En effet, celui-ci a fait l'objet de nombreuses études à l'échelle du bassin versant ou à l'échelle des parcelles élémentaires. Par contre à l'échelle de la parcelle agricole, les développements ont été beaucoup moins conséquents. Afin d'établir des références propres au contexte de la plaine du Gharb, des expérimentations et une approche de modélisation du ruissellement et de l'impact des excédents d'eau sur la betterave à sucre ont été mises en œuvre. Elles ont permis de mettre en évidence le rôle du drainage de surface à l'échelle de la parcelle agricole sur une culture la betterave à sucre.

Le premier objectif de cette thèse était d'analyser le comportement d'une parcelle nivelée dotée d'un système de raies vis à vis du ruissellement hivernal et d'évaluer l'impact du déficit du ruissellement relatif à une parcelle non nivelée sur le rendement de la betterave à sucre. L'association d'une problématique conjointe d'irrigation et de drainage constitue l'originalité de ce travail. Cette thématique s'inscrit dans le contexte de la politique d'économie de l'eau et de sa valorisation, conduite par le gouvernement marocain. Les engorgements hivernaux réduisent les potentialités de production des cultures d'hiver. Celles-ci sont soit réduites à néant soit handicapées de telles sortes qu'elles ne peuvent par la suite bénéficier pleinement des effets de l'irrigation. Il en résulte alors une diminution de la valeur ajoutée du mètre cube d'eau distribué.

L'étude expérimentale fait apparaître que quelles que soient les conditions climatiques de la campagne (pluvieuse ou sèche), la betterave à sucre se trouve toujours sujette à des excédents d'eau à certaines périodes de la campagne agricole. Ces excédents d'eau sont plus particulièrement préjudiciables en début de cycle où les processus élémentaires de mise en place des peuplements, de croissance et de développement de la culture sont importants. Le recours au nivellement et la mise en place de raies longues jouent un rôle prépondérant dans l'évacuation des excès d'eau de surface en hiver. Le drainage de surface contribue à évacuer entre 20 et 60% de l'excédent pluviométrique. Durant nos campagnes d'expérimentations les deux parcelles nivelées avec ou sans raies n'ont été sujettes à aucun excès d'eau. A la faveur de quelques observations, on peut même formuler que les contraintes

d'excès d'eau que connaît une parcelle non nivelée peuvent se produire en période d'irrigation pour une parcelle irriguée par aspersion.

Le nivellement de surface et le système de la raie longue en favorisant l'évacuation des excès d'eaux hivernaux, contribuent à l'accroissement des rendements de la betterave à sucre et à une meilleure valorisation de l'eau apportée par l'irrigation. Dans le contexte du Gharb, la mise en valeur agricole doit donc être raisonnée en intégrant la contrainte hivernale à l'origine des excès d'eau préjudiciables aux cultures. Pour bénéficier pleinement de l'apport de l'irrigation, les cultures doivent disposer de leurs potentialités à la sortie de l'hiver. Le nivellement et la mise en place des raies longues jouent un rôle fondamental dans l'atteinte de ces potentialités de production.

Concernant la parcelle nivelée et pour évaluer les performances des raies pour l'évacuation des eaux de ruissellement lors des événements extrêmes, un modèle numérique de simulation a été développé selon le processus hortonien dont l'existence a été justifiée expérimentalement. Ce modèle simule la genèse du ruissellement et les hydrogrammes de crue à l'exutoire d'un fossé recueillant les eaux de N raies d'irrigation d'une parcelle de forme rectangulaire et de raies de pentes uniformes (telle est la configuration préconisée pour les aménagements gravitaires du périmètre du Gharb). Le modèle couple une fonction de production basée sur l'équation du Green et Ampt (1911) et le modèle de l'onde cinématique pour le transfert de l'eau à travers un système de raies. Le modèle a été calé et validé. Cette approche de modélisation peut être utilisée pour le dimensionnement des fossés d'assainissement dans le périmètre du Gharb. La superficie qui reste à aménager en grande hydraulique dans le Gharb est de l'ordre de 110 000 ha. Le débit à l'exutoire de la parcelle agricole nivelée avec raies résultant de la simulation est très important et ne peut être évacué par le réseau de colatures telles qu'elles sont dimensionnées actuellement dans le périmètre du Gharb.

Pour le cas de cette même parcelle, le recours à l'irrigation est nécessaire pour assurer les rendements. L'objectif était d'analyser l'impact de l'irrigation à la raie sur le rendement de la betterave sur une parcelle n'ayant pas souffert d'excès d'eau en hivers. A cet effet, le modèle SOFIP analysant l'impact des pratiques d'irrigations à la raie sur le rendement et les efficacités a été utilisé. Ce modèle consiste en un couplage d'un modèle prédictif de l'irrigation à la raie (RAIEOPT) et un modèle de culture (PILOTE) à travers un générateur de paramètres. Ce GP est basé sur la méthode de simulation de Monte Carlo laquelle a été modifiée pour tenir compte des spécificités du processus d'avancement observées à l'échelle de la parcelle pour N raies dans différentes conditions. Ce modèle a été calé et validé pour le

cas de la betterave à sucre dans le Gharb. Le couplage du modèle d'irrigation et du modèle de culture a été validé par la comparaison du bilan hydrique simulé et mesuré.

Pour analyser l'impact de la submersion sur la parcelle non nivelée, il n'est pas réaliste d'entreprendre une modélisation mécaniste des processus de submersion sur une parcelle non planée. Les zones basses où les plantes souffrent d'hydromorphie, recueillent l'eau des zones hautes où les conditions de développement sont plus favorables. Seule une approche spatialisée pourrait rendre compte réellement de ce qui se passe dans cette parcelle. Cette approche reste lourde à conduire. Finalement, l'option de modélisation retenue repose sur une approche conceptuelle qui consiste à considérer une parcelle virtuelle où les mécanismes de submersion locaux seraient traités selon une approche globale. Ainsi, le modèle PILOTE adapté à la submersion a été calé et validé.

Les simulations de rendement de la betterave à sucre sur la série disponible de onze années climatiques en comparant la parcelle nivelée dotée de raies irriguée gravitairement et la parcelle non nivelée irriguée en aspersion pour 3 dates de semis mettent largement en évidence les avantages de la parcelle nivelée dotée de raies. Les semis de novembre présentent les meilleurs rendements en raison des durées de cycles plus élevée (cumul de rayonnement plus élevé), des valeurs de température plus basses que pour les semis tardifs. Il a aussi été constaté que les années pluvieuses, à faible ensoleillement, sont préjudiciables au semis précoces. Concernant la parcelle non nivelée irriguée en aspersion, les submersions affectent les plantules pour le semis précoce. Les semis tardif ne peuvent être réalisés pour raison d'impraticabilités des parcelles. Le report des dates de semis ne peut dépasser en fait la première semaine de février à cause des chaleurs de début de saison estivale qui pénalisent la croissance de la betterave. Les semis de novembre affichent les meilleurs rendements.

Concernant la valorisation de l'eau pour la parcelle nivelée dotée de raies et irriguée gravitairement, le semis de novembre présente la plus forte WUE par rapport aux semis précoce et tardif qui présentent quant à eux la même valorisation. Un semis précoce nécessite plus fréquemment un arrosage dès le semis et un semis tardif est plus exposé aux sécheresses de fin de cycle.

Le Maroc a déployé des efforts indéniables par la mise en place d'infrastructures hydrauliques importantes. Une accumulation d'expériences satisfaisantes dans le domaine de la mobilisation et de la distribution de l'eau pour la satisfaction des besoins en eau du développement économique et social a pu être ainsi réalisée. Cet effort a permis d'atteindre dès 1997, l'objectif fixé par les pouvoirs publics à la fin des années 60, et qui consistait à

irriguer 1 million d'hectare en l'an 2000. La dernière décennie a également connu l'initiation de la réforme du cadre institutionnel et réglementaire à travers la promulgation de la Loi 10-95 sur l'Eau (B.O.R.M, 1995). Et un plan ambitieux d'économie de l'eau a été mis en place à travers des encouragements par le biais de subventions destinées aux techniques économes en eau et à l'irrigation de complément (AGR, 2007). Ces subventions peuvent atteindre 60 % du montant d'investissement (B.O.R.M, 2006). Les techniques économes en eau portent principalement sur l'irrigation localisée pour reprendre le terme choisi par la FAO en 1976 en raison des apports d'eau effectués au voisinage immédiat des plantes. Cette technique qui malgré ses avantages reste sophistiquée, délicate d'emploi nécessitant des matériels adaptés, de bonne qualité et une compétence élevée de la part des utilisateurs Penadille (2006). Slatni *et al.*, (2005) avaient noté en Tunisie que certains agriculteurs conduisent le localisé de la même manière que le gravitaire et ont mis l'accent sur la formation et la vulgarisation des agriculteurs pour la gestion de ce système. Il est vrai que le système d'irrigation localisé bien dimensionné et bien conduit aboutit à des économies d'eau à l'échelle de la culture. Toutefois, la technique d'irrigation localisée nécessitant la mise en place d'un réseau dense de canalisations (rampes) couvrant totalement la surface à irriguer présente le coût d'équipement le plus élevé à la parcelle par rapport aux autres techniques dites traditionnelles. Pour rentabiliser l'investissement mis en place, le recours à l'intensification est primordial et delà une forte demande en eau. Aujourd'hui, les chercheurs à travers le monde entier sont convaincus que le localisé n'aboutit pas aux économies d'eau escomptées mais plutôt à une meilleure rationalisation et valorisation de l'eau d'irrigation. De ce fait, des économies substantielles sont à rechercher au niveau de l'amélioration du système gravitaire qui occupe 80% de la superficie aménagée aujourd'hui en Grande Hydraulique au Maroc et le système aspersion. Les améliorations porteraient principalement sur la réalisation du nivellement et l'adoption de la raie longue pour le gravitaire. Même en admettant que le localisé soit la technique la plus économe en eau, la mise en place de ce système sur une parcelle sans s'assurer de la qualité de son nivellement risque d'entraîner une mauvaise valorisation de l'eau. L'amélioration du gravitaire (tout ne peut être reconverti en localisé) passerait aujourd'hui par l'encouragement des agriculteurs à entretenir leur nivellement par l'instauration de subventions. La majorité des parcelles nivelées nécessiterait un surfacage lequel doit être intégré dans le train technique cultural au même titre que les autres opérations de préparation du sol. Il ressort aussi de ce travail que la mise en valeur agricole dans le Gharb doit être raisonnée en tenant compte de la période hivernale et des excédents d'eau générés durant cette période. A cet effet, le nivellement des parcelles aspersion est impératif

pour l'amélioration des rendements obtenus dans les secteurs aspersifs et qui sont souvent affectés par les excès d'eau. La réalisation du nivellement est à étendre aussi pour les parcelles irriguées en localisé dans la plaine du Gharb à l'exception des sols sableux bien évidemment.

Enfin le drainage de surface nous a permis d'appréhender l'effet bénéfique de l'élimination rapide des excédents d'eau sur le rendement de la betterave à sucre. Le message délivré par le présent travail est que le concept de drainage ne doit pas se limiter qu'au domaine souterrain. La complémentarité des deux composantes du drainage : superficiel et souterrain est essentielle tout en révisant le poids à accorder au premier lors de la conception des ouvrages et l'entretien à leur accorder. L'approche de modélisation adoptée peut servir au dimensionnement des ouvrages d'assainissement à l'échelle de la parcelle agricole. Les équipements hydro agricoles mis en place dans le cadre de l'aménagement de la plaine, ne prendraient leur sens que si toutes les contraintes liées au développement agricole sont levées. Ces contraintes touchent aussi bien les itinéraires techniques adoptés par les agriculteurs liés à la prise de risque en fonction des facteurs climatiques (excès d'eau, sécheresses etc...) que les aspects socioéconomiques liées principalement au morcellement des terres et à la commercialisation.

En terme de perspectives de recherche, il serait utile de continuer ces travaux expérimentaux et de modélisation en essayant de :

- Tester d'autres écartements de raies ;
- Réduire le pas de temps pour la mesure des précipitations en adoptant des pas de temps plus fins ;
- Evaluer l'impact des submersions sur les autres cultures souffrant de l'excès d'eau notamment les céréales.

Notre travail peut être considéré comme une contribution à l'amélioration des pratiques du gravitaire dans la plaine du Gharb. Il apporte des éléments clés pour garantir une meilleure valorisation de l'eau dans la perspective d'une extension des systèmes d'irrigation modernisée qu'il s'agisse du goutte à goutte ou de l'aspersion.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGR (2007). Programme national d'économie d'eau en irrigation. PNEEI
- Ahmad, N., & Kanwar, R.S. (1991). Effet of different moisture stress levels on corn growth in field lysimeters. *Transactions of the ASAE*, 34(5) : 1991-1996.
- Ahmad, N., Kanwar, R.S., Kaspar, T. C., & Bailey, T.B. (1992). Effet of soil surface submergence and a water table on vegetative growth and nutrient uptake of corn. *Transactions of the ASAE*, 35 : 1173-1177.
- Ahuja, L., Fiedler, E., Dunn, G., Benjamin, J., & Garrison, A. (1998). Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Science Society of America Journal*, 62 : 1228-1233.
- Ait Kadi, M., & Lahlou, O. (1987). Schémas d'aménagement des périmètres irrigués au Maroc et la conduite des irrigations. *Homme Terre & Eaux*, 17 : 100-110.
- Allen, R.G, Pereira LS, Raes D, & Smith M. (1998). Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigations and Drainage. Paper 56 ; fao Rome ? Italie, 300P.
- Alvarez, J.A.R. (2003). Estimation of advance and infiltration equation in furrow irrigation for untested discharges, *Agric. Water Manag.* 60 : 227-239.
- Ambroise, B., Beven, K. & Freer, J. (1996). Toward a generalization of the TOPMODEL concepts : topographic indices of hydrological similarity. *Water Resour. Res.*, 32(7) : 2135-2145.
- American Society of Civil Engineers ASCE (1993). Task committee on definition of watershed models of the watershed management committee. Irrig. and Drain. Div. : Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. and Drain. Eng., ASCE* 119(3) : 429-442.
- Andrieux P., Louchart, X., Voltz, M., & Bourgeois, T. (1996). Déterminisme du partage infiltration-ruissellement sur parcelles de vigne en climat méditerranéen. Document-BRGM 256, Editions du BRGM, Orléans, p. 7-11
- Aschi Smiti, S., Bizid, E., & Hamza, M. (2003). Effet de l'hydromorphie sur la croissance de quatre variétés de trèfle (*Trifolium subterraneum* L.). *Agronomie*, 23 : 97-104.
- Atif, E. M., Taky, A., Hammani, A., & Bouarfa, S. (1999). Drainage de la plaine du Gharb. Proceeding de l'atelier sur le drainage dans le Gharb, Kénitra, Maroc du 21 au 23 octobre 1998.

- Augeard, B. (2006). Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol agricole drainé sensible à la battance. Etude expérimentales et modélisation. Doctorat Sciences de l'eau, ENGREF Paris, p 236.
- Bautista, E., & Wallender, W.W. (1992). Hydrodynamic furrow irrigation model with specified space steps. *J. Irrig. and Drain. Engin.*, ASCE, 118(3) : 450-465.
- Bautista, E., & Wallender, W.W. (1985). Spatial variability of infiltration in furrows. *Trans. of ASAE*, 28(6) : 1846-1855.
- Bazza, M., & Taj, A. (1990). Effets du régime hydrique et de la qualité de l'eau d'irrigation sur le rendement et la qualité technologique de la betterave à sucre dans le périmètre du Gharb, *Sucrierie Maghrébine*, Spécial IIRB, 42-43 : 58-66.
- Belabbès, K. (1999). Conduite de l'irrigation du riz et efficience du transport et de l'utilisation de l'eau dans le secteur rizicole de la plaine du Gharb au Maroc. Séminaire Euro-Méditerranéen sur la maîtrise de l'irrigation et du drainage. Rabat, Maroc. 27-29 octobre 1999.
- Belford, R. K. (1981). Response of winter wheat to prolonged waterlogging under outdoor conditions. *J. Agric. Sci. Cam.* 97 : 557-568.
- Bentiss, F., & Farhaoui, M. (1999). Etude de l'efficience et de l'efficacité des réseaux de drainage et d'assainissement dans le secteur S11 du Gharb. Mémoire de troisième cycle en agronomie option Génie Rural, IAV Hassan II, Rabat, MAROC
- Berthomé, P. (1991). Modélisation de l'infiltration en irrigation à la raie. Résolutions numériques et analytiques Application à l'étude de la conduite des arrosages. Thèse de doctorat (PhD) Inst. Polytech. de Toulouse. 200 p.
- Betson, R.P. (1964). What is watershed runoff ? *J. Geophys. Res.*, 69(8) : 1541-1552.
- Boiffin, J., Hubert, B., & Durand, N. (2004). Agriculture et développement durable, enjeux et questions de recherche. INRA, édition.
- Bonell, M. (1993). Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *J. Hydrol.*, 150(2-4): 217-275.
- B.O.R.M. (1969). Bulletin officiel du Royaume du Maroc concernant le code des investissements agricoles modifié et complété le 10 janvier 1984. N°2960 bis du 29 juillet 1969.
- B.O.R.M. (1995). Bulletin officiel du Royaume du Maroc concernant la loi sur l'eau. N°4325 B.O.R.M du 20 septembre 1995.

- B.O.R.M. (2006). Bulletin officiel du Royaume du Maroc portant sur les modalités de l'aide de l'Etat en vue de l'aménagement des propriétés agricoles en systèmes d'irrigation localisée ou de complément. N°5474 B.O.R.M. du 16 novembre 2006.
- Bouarfa, S., Hammani, A., Baqri, A., Chaumont, C., & Drouri, B. (1998). Synthèse des résultats acquis sur la station expérimentale du Gharb. In : Proceedings Atelier International sur le drainage dans le Gharb. Actes Editions. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II Rabat. 16 p.
- Bouarfa, S., Hammani, A., Debbarh, A., Zimmer, D., Taky, A., Chaumont, C., Vincent, B., & Zeraouli, M. (2002). Drainage design in the Gharb plain of Morocco. *Irrigation and Drainage Systems*, 16 :89-110.
- Bouarfa S., & Zimmer D., (2000). Water table shapes and drain flow rates in shallow drainage systems. *J. Hydrol.*, 235 : 264-275.
- Bousraref, A., 1999. Techniques de la conduite de la betterave à sucre dans le Gharb. ORMVAG, Rapport interne. Kenitra.
- Brisson, N. (2002). Response of the root system of a winter wheat crop to waterlogging. *Plant and soil*, 243 : pp 43-55.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillière, J.P., Maraux, F., Seguin, F. B., & Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18, 309-332.
- Brisson, N., Mary, B. (2002). STICS, Notice concepts et formalismes. Version n°5
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Cellier, P., Machet, J. M, Meynard, J.M, & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18 : 311-346.
- Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, P., Jeuffroy, M.H, Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., & Juste E., 2002. STICS: a II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn. *Agronomie* 22, 69-93.
- Burt C.M., Clemmens A.J, Strelkoff T.S., Solomon K.H., Howell T., Eisenhauer D., & Bleisner R. (1997). Irrigation performance measures. Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6) : 423-442.

- Bzioui, M. (2004). Rapport national sur les ressources en eau au Maroc. UN WATER-  
AFRICA. 94 pages
- Campbell, G., S. (1985). Soil physics with basic. Transport models for soil-plants systems.  
Elsevier, Amsterdam, 150 pp.
- Campbell Scientific (1999). CS615 Réflectomètre de teneur en eau. Manuel d'utilisation.
- Cannell, R.Q., & Belford, R. K. (1982). Crop growth after transient waterlogging. advances in  
drainage. 163-170.
- Cannell, R. Q., Belford, R.K., Blackwell, P. S., Govi., G., & Thompson, R. J. (1985). Effects  
of waterlogging on soil aeration ant root and shoot growth and yield of winter oats.  
Plant and soil, 85 : 361-373.
- Cappus, P. (1960). Etude des lois de l'écoulement. Application au calcul et à la prévision des  
débits. La Houille Blanche, A : 493-520.
- Cariolle, M. (2007). ARVALIS INFOS. LES CULTURALES
- Carter, J.N. (1987). Sucrose production as affected by root yield and sucrose concentration of  
sugarbeets. J. of.the American Society of Sugarbeet Technologist, 24 (1) : 14-31.
- Carter, C. E., & Camp, C. (1995). Drain sapcing effects on water table control and sugar cane  
yield. *Transactions of ASCE*, 37(5) : 1509-1513.
- Castillo, V. M., Gomez-Plaza, A., & Martinez-Mena, M. (2003). The role of antecedent soil  
water content in the runoff response of semiarid catchments : a simulation approach.  
*Journal of Hydrology*, 284, 114-130.
- Cavazza, L., & Pisa., P.R. (1988). Effet of watertable depth and waterlogging on crop yield.  
*Agric. Water Manag.* 14 : 29-34.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C.  
& Dubreuil, N. (2004). Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in  
agricultural areas in Normandy. *J. Hydrol.*, 299(1-2) : 4-14.
- Cerdan, O., Souchere, V., Lecomte, V., Couturier, A. & Le Bissonnais, Y. (2001).  
Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : Sealing  
and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*,  
46(2-3) : 189-205.

- Chabot, R. (2001). Influence des prélèvements racinaires sur le fonctionnement hydraulique du drainage : Application à une culture de canne à sucre irriguée. Thèse de Doctorat INA PG, Paris, France, 240 pages.
- Chabot, R., Bouarfa, S., Zimmer, D., Chaumont, C., & Duprez, C. (2002). Sugarcane transpiration with shallow water-table : sap flow measurements and modelling. *Agric. Water Manag.* 54 : 17-36.
- Chapman, S. C., Hammer, G. L., & Meinke, H. (1993). A sunflower simulation model : I. model development. *Agron. J.*, 85 : 725-735.
- Chati M.T., El Bouhali I., Bekraoui A., & Handoufe, A. (1999). Synthèse des résultats de 12 années d'essais des besoins en eau de la betterave à sucre dans le Tadla. Séminaire sur "L'économie de l'eau", ORMVA du Haouz, 1999.
- Chaumont, C., Bouarfa, S., Taky, A., & Vincent, B. (1999). Techniques et incertitudes de mesure des débits en parcelle drainées. Séminaire Euro-méditerranéen, Rabat Maroc du 27 au 29 Octobre 1999, 319-330.
- Childs, J.L., Wallender, W.W., & Hopmans, J.W. (1993). Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *J. Irrig. and Drain. Engin.*, ASCE, 119(1): 74-90.
- Choisnel, E., & Van Thournout, A. (1985). L'excès d'eau en tant que phénomène météorologique et microclimatique. 1. Le phénomène pluvieux. In : Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. Proceedings of the Commission of Agrometeorology. 9-11 October 1985. Paris INRA. 21-33.
- Chow V.T. & Ben-Zvi, A. (1973). Hydrodynamic modelling of two dimensional water flow. *J. Hydraul. Div., ASCE*. HY 99(11), pp2023-2040.
- Chu S.T. (1978). Infiltration during unsteady rain. *Water Resour*
- Corlier, L. (1975). Les reponses en eau de la betterave sucrière : quatorze années d'expérimentations (1961-1974) dans le Tadla et la Moulouya. CE Bureau des besoins en eau . DER, MARA.
- Cox, W.J., Jolliff, G.D. (1986). Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. *Agron. J.*, 78 : 226-230.
- Cros-Cayot, S. (1996). Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte armoricain, Thèse de doctorat de l'ENSAR, 218 p.
- Cunge J.A., Holly F.M. & Verwey A. (1980). Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman Ltd.
- Darboux, F. (1999). Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement, effet de la rugosité sur les distances de transfert, Thèse de Géosciences Rennes, 170 pp.

- Debbarh, A., Daniane, M., & Tabet, A. (1991). Problématique du drainage au Maroc. *Hommes Terre et Eaux*, Vol 21 n°28.
- Debbarh, A., Hammani, A., Bouarfa, S., & Chaumont, C. (1998). Résultats de deux années de suivi de la salinité des eaux et des sols sous drainage (station expérimentale de Souk Tlet). Proceedings de l'Atelier du drainage de la plaine du Gharb. Kénitra, Morocco. October 21-23, 1998. Actes Editions, Rabat.
- Debbarh, A., Hammani, A., Bouarfa, S., & Chaumont, C. (1999). Résultats de deux années de suivi de la salinité des eaux et des sols sous drainage (station expérimentale de Souk Tlet). Séminaire Euro-Méditerranéen, 27-29 Octobre 1999 Rabat, MAROC.
- Diskin, M., Nazirov, N. (1995). Linear reservoir with feedback regulated inlet as a model for the infiltration process. *Journal of Hydrology*, 172 : 313-330.
- Doorembos, J., Kassam, A. H. (1980). Réponse des rendements à l'eau. Bull. Irrig. Drain. 33., FAO.
- Doorembos, J., Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. Bull. Irrig. Drain. 24., FAO.
- Draycott, A. (1972). Sugarbeet nutrition, Applied Science, publishers LTD, London : 188-197.
- Drew, M.C. (1983). Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment : a review. *Plant and soil*, 75 : 179-199.
- Dunne, T. (1983). Relation of fields studies and modeling in the prediction of storm runoff. *Journal of Hydrology*, 65 : 25-48.
- Dunne, T. & Black, R.D. (1970). Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. *Water Resour. Res.*, 7 : 1160-1172.
- Earl, R. (1997). Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. *Soil and Tillage Research*, 40 : 155-168.
- EL Amraoui, I. (1998). Evaluation du réseau de drainage dans la plaine du Gharb : méthodologie et définition d'indicateurs de performances. Mémoire de troisième pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Rural, IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- Elliot, R. L., Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow irrigation and advance functions. *Trans. ASAE*, 25(6) : 396-400.
- Ennahari, J., Zehauf, M. (1999). Techniques de conduite de la betterave à sucre. Stage de Formation des Vulgarisateurs de l'ORMVAG. CTCS. 10 pages.
- Erie, L.J., French, O. F. (1968). Water management of fall-planted sugar beet in salt river valley of Arizona. *Transaction of the ASAE* : 792-795.

- Ernest, L.F. (1956). Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross-section. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 4 : 126-131.
- Esteves M., Faucher X., Galle S., & Vauclin M. (2000). Overland flow and infiltration for small plots during unsteady rain : numerical results versus observed values. *J.Hydrol.*, 228 : 265-282.
- Evans, R. O., Skaggs, R. W., & Sneed, R. E. (1991). Stress day index models to predict corn and soybean relative yield under high water-table conditions. *Amer. Soc. of Agric. Eng.*, 34 : 1997-2005.
- FAO (2002). <http://www.fao.org/waicent/FAOINFO/AGRICULT/agl/agall/gaez/nav.html> on march 18,2002.
- Favre, G., & Zimmermann, A. (2006). *Revue suisse Agric.* 38 (6) : 315-321.
- Feddes, R. A., Kowalik, P.J., & zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield, simulation monographs, 188p., Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Field, W. P. (1990). World irrigation . *Irrigation and drainage systems*, 4 : 91-107.
- Freeze, R. A. (1972). Role of subsurface in generating surface runoff, 2. Upstream source areas. *Water Resources Research*, 8(5) : 1272-1283.
- Fohrer, N., Berkenhagen, J., Hecker, J.M., & Rudolph, A. (1999). Changing soil and surface conditions during rainfall - Single rainstorm/subsequent rainstorms. *Catena*, 37(3-4): 355-375
- Gayle, G. A., Skaggs, R. W., & Carter, C. E. (1987). Effects of excessive soil water conditions on sugarcane yields. *Trans. ASAE*, 30 : 993-997.
- Gardner W.R. (1958). Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation. *Soil Sci*, 85 : 228-232.
- Gonzalez Gamacho J.M. (1991). Modélisation stochastique d'une irrigation à la raie. Thèse de Doctorat (PhD) , Univ Montpellier II, 270p.
- Goudriaan, J., & Van Laar, H. H. (1994). Modelling potentiel crop growth process. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.
- Govers, G., Takken, I., & Helming, K.(2000). Soil roughness and overland flow. *Agron.*, 20: 131-146.
- Green W. H. & Ampt G. A. (1911). Studies in soil physics I. The flow of air and water through soil. *J. Agric. Sci.*, 4 : 1-24.
- Gril, J. J., & Duvoux, B. (1991). Maîtrise du ruissellement et de l'érosion. Conditions d'adaptation des méthodes américaines. Editions CEMAGREF-DICOVA.

- Gupta, S. K., Singh, R. K. & Pandey, R.S. (1992). Surface drainage requirement of crops : Applications of piecewise linear model for evaluating submergence tolerance. *Irrigation and Drainage Systems*, 6 : 249-261.
- Hammani, A. 2002. Modélisation couplée du drainage souterrain et du drainage de surface : Application à la conception du drainage agricole dans le périmètre irrigué du Gharb (Maroc). Doctorat, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
- Haverkamp, R., Kutilek, M., Parlange, J.Y., Rendon, L., & Krejca, M. (1988). Infiltration under ponded conditions : 2. Infiltration equations tested for parameter time-dependence and predictive use. *Soil Science*, 145 (5) : 317-329.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y, Starr, L., Schmitz, G., & Fuentes, C. (1990). Infiltration under ponded conditions : 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*, 149 (5) : 292-300.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J. & Parlange, J.Y. (1994). 3-Dimensional Analysis of Infiltration from the Disc Infiltrometer .2. Physically-Based Infiltration Equation. *Water Resour. Res.*, 30(11) : 2931-2935.
- Heartherly, L.G., & Pringle, H. C. (1991). Soybean cultivars response to flood irrigation of clay soil. *Agron. J.*, 83 : 231-236.
- Heasom, W., Traver, R.G., & Welker, A., 2006. Hydrologic modelling of a bioinfiltration best management practice. *JAWRA* 42(5): 1329-1347
- Hillel, D. (1980). Fundamentals of soil physics. Academic Press, New-York, 413 pp.
- Hlavek, R. & Lesaffre, B. (1983). Fonctionnement hydraulique du drainage agricole en sols à pseudo-gley. Conséquences sur le dimensionnement des projets et l'influence sur les crues. Inf. techn. du Cemagref 52(1) et 53(1), 12 pages.
- Hodgson, D.R., Whiteley, G.M., & Bradnam, A. E. (1989). Effects of waterlogging in the spring on soil conditions and the growth and yield of spring barley in three cultivations systems. *J. Agric. Sci. Camb.* 112 : 265-276.
- Hoffmann, C. M., & Blomberg, M. (2004). Estimation of Leaf Area Index of Beta vulgaris L. Based on optical Remote Sensing Data. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 190, (3) : 197-204
- Hooghoudt, (1940). Hooghoudt's theory of drainage Traduction en anglais de la publication originale de Hooghoudt par l'Institut Voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14: 446-460.

- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron.J.*, 93 : 281-289.
- Huang, C., Gascuel-Oudou, C. & Cros-Cayot, S. (2001). Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, 46 : 177-188.
- Jenane, C., El Himdy, B., Bousraref, A., & Haddadi, L. (1997). Essai comparative de tris techniques de semis pour la betterave monogerme: Semis à plat, sur billons et sur planches. In : Actes de la journée sur les techniques d'installation de la betterave sucrière monogerme.
- Jordan, J.P. (1994). Spatial and temporal variability of stormflow generation processes on a Swiss catchment. *J. Hydrol.*, 153: 357-382.
- Kandil, H. M., & Willardson, L. S. (1992). Relating crop-yield response to water-table fluctuations. *J. Irr. Drain. Eng.*, 118 : 113-121.
- Kao, C. (1994). Le ruissellement en parcelle agricole en situation hivernale : mécanismes de genèse et modélisation. DEA National d'hydrologie, Filière Hydrogéologie et Hydrologie Quantitatives.
- Kao, C., Nedelec, Y. & Zimmer, D. (1998). Surface runoff mechanisms and modeling in subsurface drained fields. In L.C.Brown (Ed), 7th International Drainage Symp. "Drainage in the 21st century : food production and the environment." ASAE, Orlando, Florida USA. Proc. : pp. 258- 266.
- Khaledian M.R., Mailhol J.C., Ruelle P., & Rosique, P. (2008). Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system : the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context, *Agricultural Water Management* (Submitted).
- Knudsen, M. (1988). Etude des corrélations entre caractères morphologiques au stade jeune et caractéristiques du rendement chez la betterave sucrière. DAA Agronomie méditerranéenne options Grandes Cultures, ENSAM Montpellier, 55 pages.
- Kutilek M. & Nielsen R. (1994). Soil hydrology. Geoscience Publisher, Cremlingen-Destedt Catena-Verlag, Germany, Chap. 5.3.2., pp104-112.
- Lahlou, O., & Hamdi, M. (1989). Problématique du drainage dans le Gharb.
- Lamacq, S., Wallender, W., W. (1994). Soil water model for evaluating water delivery Flexibility. *Journal of Irrig. and Drain. Engin.*, ASCE, 120(4) : 756-774.
- Larson, W. (1964). Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. Soil Science Society of America Proceedings 28, 119-122.
- Le bettravier. (2008). Semis et levées. Les betteraves ont perdu 8 % de rendement potentiel. Numéro : 899.

- Ledent, F. (1988). Ecologie des cultures tempérées. Cours de phytotechnie, Faculté des Sciences Agro. Université Catholique de Louvain. Belgique.
- Léonard, J., & Andrieux, P. (1998). Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32 : 209-223.
- Lesaffre, B. (1988). Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés, Thèse de l'Université Paris VI, 334 pp.
- Lesaffre, B. (2003). L'eau dans les pays en développement: des défis à relever pour la recherche. Les rencontres internationales de prospective du Senat.
- Lesaffre, B., & Zimmer, D. (1988). Subsurface drainage peak flows in shallow soil. *J. Irr. Drain. Eng.*, 114(3) : 387-406.
- Lewis MR., & Milne, WE. (1938).'' Analysis of border irrigation ''. *Agric. Eng.* 19 : 267-272.
- Mailhol, J.C. (2001). Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de doctorat (PhD), Univ Montpellier II, 276p + annexes.
- Mailhol, J.C. (2003). Validation of a predictive form of Horton infiltration for simulating furrow irrigation.. *J. of Irrig. and Drain. Engin. ASCE*, (129), NO 6, 412-421.
- Mailhol, J. C. (2005). Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts. Mémoire pour l'Habilitation à Diriger les Recherches. Université de Montpellier II, France, 106 pages.
- Mailhol, J.C., Baqri, H., & Lachhab, M. (1997a). Operative irrigation furrow modelling for real-time applications on closed-end furrows. *Irrig. and Drain. Syst.* 11 : 347-366.
- Mailhol J.C. & Gonzalez J.M. (1993). A furrow irrigation model for real time applications on cracking soils - *J. Irrig. and Drain., ASCE*, Vol 119(5) : 768-783.
- Mailhol, J.C., & Merot, A. (2008). SPFC: a tool to improve water management and hay production in the Crau region. *Irrig. Sci.*, 26(4) : 289-302
- Mailhol, J.C., Olufayo A., & Ruelle P.(1997b). Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated area index. *Agr. Water Manag.* 35 : 167-182.
- Mailhol J.C., Priol M. & Benali M. (1999). A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. *Agric. Water Management.* 42 : 65-80.
- Mailhol, J.C. & Ruelle P. (1999). Un outil opérationnel pour l'analyse des stratégies d'irrigation du maïs au moyen d'un canon enrouleur ICID 17ième congrès international Grenade 11—19 Sept. 1999.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., & Nemeth, I. (2001). Impact of fertilisation practices on nitrogen

- leaching under irrigation''. *Irrig. Sci.* 20 : 139-147.
- Mailhol, J.C., Ruelle P., & Popova, Z. (2005). ''SOFIP: A field-scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 24 : 37-48.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., Revol, Ph, Delage, L., & Lescot, J.M. (1996). Operative modelling for actual evapotranspiration assessment: Calibration methodology. ASAE proceeding of Int. Conf. 3-6 Nov., San Antonio (Texas) 474-479.
- Mantovani, E.C., Villalobos, F.J, Organaz, F., & Fereres, E. (1995).Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agric Water Manag.* (27) : 243-257.
- Marcesse, J. (1967). Détermination de la capacité de rétention d'un sol au moyen de l'humidimètre à neutron. I.A.E.A. Symposium, Istanbul, pp 138-144.
- Mein R.G., & Larson, C.(1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resour. Res.*, 9: 2384-394.
- Mérot, P. (1988). Les zones de sources à surface variable et la question de leur localisation. *Hydrol. Cont.*, 3 : 105-115.
- Meyer, W. S., & Barrs, H. D. (1988). response of wheat to single, short-term waterlogging during and after stem elongation. *Aust. J. Agric. Res.* 39 : 11-20.
- Meynard, J. M. (1985). Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon.
- Montgomery, D.R., & Dietrich, W.E. (1995). Hydrologic processes in a low-gradient source area. *Water Resour. Res.*, 31(1) : 1-10
- Mosseddaq, F., Bahajjoub M., & Errahj, M. (2005). Transfert des resultants de recherché aux agriculteurs. Cas de la conduite technique de la betterave à sucre en irrigué au gharb. Actes du séminaire Euro-Méditerranéen sur la modernisation de l'agriculture irriguée Tome 2, 124-138p, (2005/2481 ISBN : 9954-447-05-9).
- Moule, C. (1972). Plantes sarclées et divers. Ed Bailliere. Paris, pp : 106-119 et pp:136-137.
- Mukhtar, S., Baker, J.L., & Kanwar, R. S. (1990). Corn growth as affected by excess soil water. *Transactions of the ASAE*, 33 (2) : 437-442.
- Munoz-Carpena R., Parsons J.E., & Gilliam J.W. (1998). Modelling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *J. Hydrol.*, 214 : 111-129.
- Musgrave, M. E., 1994. Waterlogging effects on yield and photosynthesis in eight winter wheat cultivars. *Crop Sci.* 34 : 1314-1318.
- Mwendura, E., & Feyen, J. (1993). Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Science*, 155 : 229-235.

- Mwendura, E., & Feyen, J. (1994). Effects of tillage and rainfall on soil surface roughness and properties. *Soil Technology*, 7 : 99-103.
- Mzibra, A., Zehauf M., & Douira A. (2008). Effect du cycle de la culture sur le rendement qualitatif et quantitatif de la betterave sucrière dans la région du Gharb (Maroc). *Biotechnol. Agrono.Soc. Environ.*, 12 (2) : 139-146.
- Newman, S.P. (1976). Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt *Water Resour. Re*, 12 : 564-566.
- Ogden, F.L. & Watts, B.A. (2000). Saturated area formation on nonconvergent hillslope topography with shallow soils : A numerical investigation. *Water Resour. Res.*, 36(7) : 1795-1804.
- Or, D. (1996). Wetting-inducing soil structure changes. The theory of liquid phase sintering. *Water Resour. Res.*, 2(10) : 3041-3049.
- ORMVAG. (1997). Fiche de présentation du périmètre du Gharb, de ses ressources naturelles et de ses ouvrages hydrauliques. 19 pages.
- ORMVAG. (2008). Inventaire des équipements hydro-agricole. Rapport interne. 10 pages.
- Oyonarte, N.A., Mateos, L., & Palomo M.J. (2002). Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of Irrig. and Drain. Engin.*, 128 : 1(26) : 26-33.
- Paige, G.B., Stone J.J., Guertin D.P. & Lane L.L. (2002). A strip model approach to parameterize a coupled Green –Ampt kinematic wave model. *J. Am. Water Resour. Assoc.* Vol. 38 (5) : 1363-1377.
- Pallix, G., & Tabet, A. (1973). Drainage d'une plaine basse côtière sur sols lourds : le Gharb. *Homme, Terres et Eaux*, 7 : 33-39.
- Papy, F. (1973). L'élaboration du rendement de la betterave à sucre. *Hommes, Terres et Eaux*, 9 : 15-34.
- Penadille., Y. (2006). Irrigation localisée. In : *Traité d'irrigation*, Paris, pp 583-633.
- Penel, M. (1988). Conduite des céréales en conditions d'excès d'eau : l'hydraulicien et l'excès d'eau. *Perspectives Agricoles* , 126 : 22-30.
- Perennes, J.-J. 1993. L'eau et les hommes au Maghreb. Contribution à une politique de l'eau en Méditerranée. Edition KARTHALA ed. KARTHALA, Paris
- Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration I. Sorptivity and algebraic infiltration equation. *Soil Sci.*, 83 : 345-357.
- Philip, J.R. (1973). On solving the unsaturated flow equation. 1. The flux-concentration

- dependent relation. *Soil Sci.*, 116 : 328-335.
- Philip, J.R., (1984). Steady infiltration from circular cylindrical cavities. *Soil Sci. Am. J.*, 48(5) : 70-278.
- Philip, J.R., & Farrell, D.N. (1964). General solution of the infiltration advance problem in irrigation hydraulics. *J. of geophysical Res.*, 69(4), 624-631.
- Pimentel, L.R.(1987). L'irrigation à la planche : développement et évaluation d'un nouveau modèle pour simuler et prédire l'avancement du front couplé à l'infiltration. Thèse de doctorat, Univ. J. Fourier, Grenoble, France.
- Planchon, O. (1991). La propagation du ruissellement le long d'un versant : nouvelles mesures et perspectives de modélisation. Ed. AUPELF UREF John Libbey. Eurotext. Paris. pp 59-75.
- Pons, Y. (1988). Effect of watertable on yield and root depth of winter wheat in french west central atlantic marshlands. *Agric. Water. Manage.* 14 : 35-42.
- Popova, Z., & Kuncheva, R.(1996). Modelling in water losses evaluation for non-homogeneous furrow set. *Journal of Irrig and Drain. Eng. ASCE*, 122 (1) : 1-6.
- Price, (2001). Guide de la réhabilitation et de la modernisation des projets d'irrigation. CIID
- Projet SID. (1986). Systèmes de production. ORMVAT, DER, Administration Générale de la Coopération au Développement du Royaume de Belgique
- Quinones, H., Ruelle P. & Nemeth I. (2003). Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors. *Irrig. and Drain.*, 52, pp203-217.
- Raes, D. (1982). A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. Dissertations de Agricultura No. 122. K.U.Leuven University, Leuven, Belgium.
- Rayej, M., & Wallender, W.W. (1985). Furrow irrigation time reduction. *J. Irrig. Drain. Eng., ASCE* , 111(2)
- Rebiere, B. (1996). Effect d'un excès d'eau sur la croissance d'une culture de blé d'hiver. Identification d'une variable de stress et analyse de la réponse de la culture. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 214 pages et annexes.
- Reboul, C. (1985). Météorologie et jours disponibles pour l'emploi de la main d'oeuvre et machines. In : Conditions et effets des excès d'eau en agriculture. Proceedings of the Commission of Agrometeorology. 9-11 October 1985. Paris INRA. pp 341-348.
- Refsgaard, J., & Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 30 (7) : 2889-2202.

- Renault, D., & Wallender, W.W., (1992). ALIVE Advance linear velocity : a flow rate.
- Richard, G., Guérif, J. (1988). Modélisation des transferts gazeux dans le lit de semence : application au diagnostic des conditions d'hypoxie des semences de betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) pendant la germination. I.- Présentation du modèle. *Agronomie*, 8 (6) : 539-547.
- Richards, A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318-333.
- Ringuelet, R. (1971). Méthodes d'assainissement superficiel des sols très lourds dans les régions méditerranéennes. *Bulletin de la FAO*, 6 : 105-121.
- Ruellan, A. (1967). Besoins en eau du coton et de la betterave sucrière. Principaux résultats obtenus par le Centre des Expérimentations. Direction de la Mise en Valeur. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire.
- Sallam, A., & Scott., H. D. (1987). Effects of prolonged flooding on soybean at the R2 growth stage. I. Dry matter and N and P accumulation. *Journal of plant Nutrition*, 10(5) : 567-592.
- SCET-Maroc. (2008). la révision du schéma d'aménagement du périmètre du Gharb et étude de factibilité de la zone non encore équipée de la plaine du Gharb dominée par le canal G. Rapport provisoire de la phase 2.
- Scott, H. D., DeAngulo, J., Wood, L.S., & Pitts, D. J. (1990). Influence of temporary flooding at three growth stage on soybeans grown on a clayey soil. *J. Plant. Nutria.*, 13 : 1045-1071.
- Setter, T.L., & Waters, I. (2003). Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barely and oats. *Plant and Soil*, 253 : 1-34.
- Sherman, L.K. (1932). Stream flow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News Record*, 108, pp : 501-505
- Singh, N. P., Sing, S., & Murar, K. (1986). Response of barley to excess water application. *Indian J. Agron.*, 31 : 165-171.
- Slatni, A., Mailhol, J.C., Zairi, A., Château, G., & Ajmi, T. (2005). Analyse et diagnostic de la pratique de l'irrigation localisée dans les périmètres publics irrigués de la basse vallée de la Medjerda en Tunisie. Actes du séminaire Euro-Méditerranéen sur la modernisation de l'agriculture irriguée Tome 1, 112-122p, (2005/2481 ISBN : 9954-447-05-9).

- Smettem, K. R. J., Chittleborough, D. J., Richards, B. G., & Leaney, F. W. (1991) The influence of macropores on runoff generation from a hillslope soil with a contrasting textural class. *J.Hydrol.*, 122 : 235-252.
- Smith, M. (1992). Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirments: 28-31 May 1990, *Land and water Development Div.* FAO, Rome, 59 pages.
- Smith, & Gary, A. (1987). Sugar beet : principles of cultivar development. Feh, W.R. (ed) MacMillan Publishing Compagny, pp.557-625.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., & Segeren, A. (1992). Report of the expert consultation on revision of FAO Guidelines for Prediction of crop Water Requirements. United Nations-Food and Agriculture Organisation, rome, 54 pp.
- Smith, R.E. & Hebbert, R.H. (1983). Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic processes. *Water Resour. Res.*, 19(4): 987-1001.
- Soil Conservation Service-USDA. (1972). Estimation of direct runoff from storm rainfall, *National Engeering Handbook*. Section 4-Hydrology 1972 pp. 10.1-12.24.
- SRAE, SH, CTGREF. (1980). Synthèse nationale des crues de petits bassins versants – Fascicule 1.Eléments de pluviométrie.30p.
- Stout, W. L., & Schnabel, R. R. (1994). Soil drainage influence on biomass and nitrogen accumulation by ryegrass. *Agrono. J.*, 86 : 111-116.
- Sugarbeets. (1972). Extr. de : Plants SC. MONOGRAPHS : Crop production in dry regions, 2 : 424-462. POLUNIN N. Ed., 672 pages.
- Swartzendruber, D. (1974). In filtration of constant flux-rainfall into soil as analyzed by the approach of Green et Ampt. *Soil Sci.* 117: 272-281
- Taky, A. (2003). Impacts des pratiques d'irrigation gravitaire sur le ruissellement hivernal. Cas de la plaine du Gharb (Maroc). Mémoire de DEA, Sciences de l'eau dans l'environnement Continental, ENGREF, Montpellier, France.
- Taky, A., Hammani, A., Baqri, A., & Zeraouli, M. (1999). Le drainage de la plaine du Gharb : problématique, historique et causes de dysfontcionnement. Séminaire Euro-Méditerranéen, 27-29 Octobre 1999 Rabat, MAROC.
- Taky, A., Mailhol J.C., Debbarh, A., Bouarfa S., Hammani A., Zimmer D., Ruelle P., & Belabbes, K. (2005). Diagnostic des pratiques d'irrigation gravitaire et possibilités d'amélioration dans le Gharb au Maroc. Actes du séminaire Euro-Méditerranéen sur la modernisation de l'agriculture irriguée Tome 1, 32-45p, (2005/2481 ISBN : 9954-447-05-9).

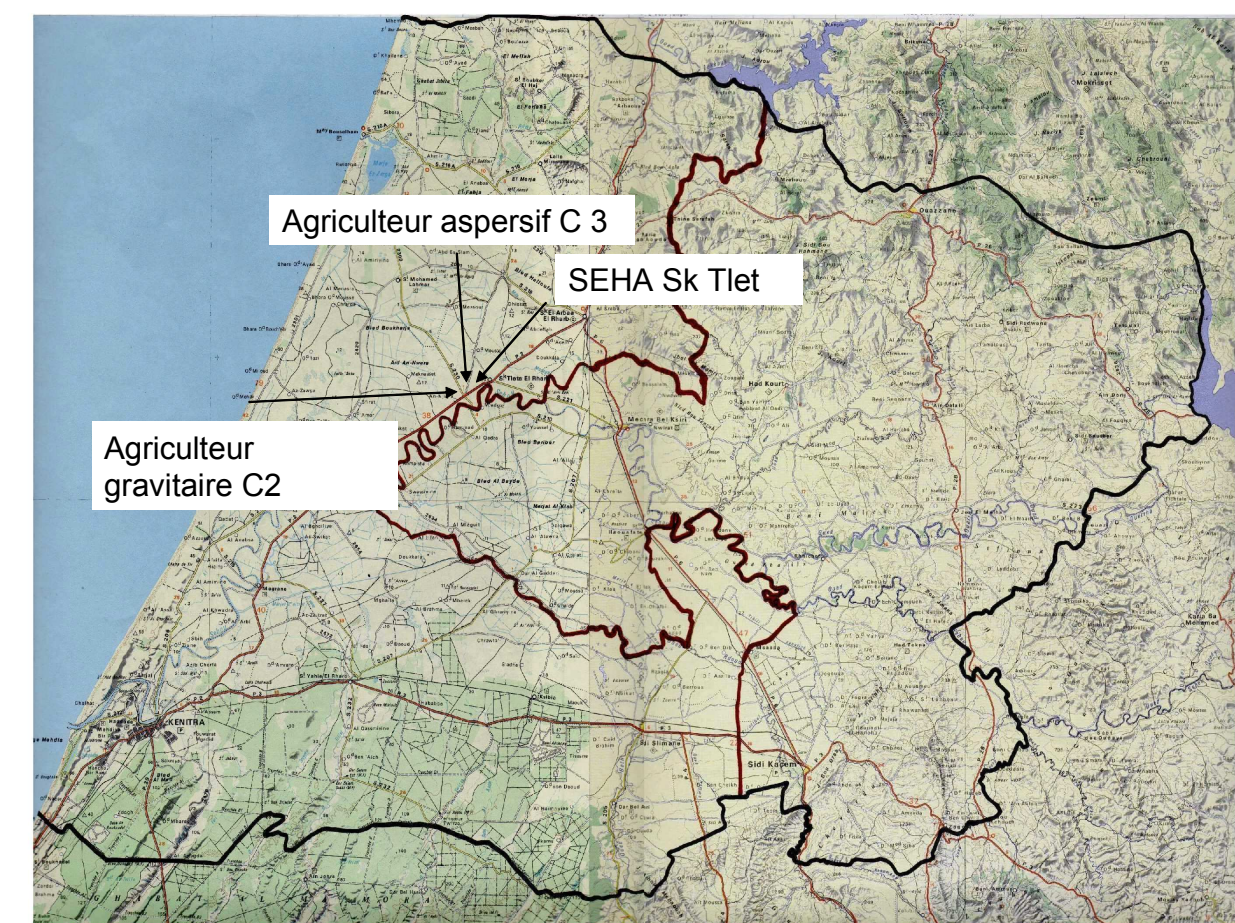
- Taylor, G., Kavvas. M.L. Govindaraju R.S., & Storm D.E. (1993). Applicability of St Venant equations for two dimensional overland flow over rough infiltration surfaces. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, 119(1), pp51-43.
- Thony J.L., Vachaud, Clothier B.E., & Angulo-Jaramillo, R. (1991). Field measurement of the hydraulic properties of soil. *Soil Technology*, vol. 4, 111-113.
- Tsialtas, J.T., & MASLARIS, N. (2008). Leaf Area prediction model for sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) cultivars. *Photosynthetica*, 46(2) : 291-293.
- Van Dijk, A., Meesters, A., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. (2005). A two-parameter exponential rainfall depth-intensity distribution applied to runoff and erosion modelling. *Journal of Hydrology*, 300(1-4) : 155-171.
- Vantoai, T., Faussey, N., & McDonald, M.J.R. (1988). Oxygen requirements for germination and growth of flood susceptible and flood-tolerant corn lines. *Crop Sci.*, 28 : 79-83.
- Veverka, K. (1983). Effect pre germination phase dry seed bed subsequent germination sugar beet. *J. Agronomy & Crop Science*, 152 : 354-363.
- Villalobos, F. J., Hall, A. J., Ritchie, J. T., & Orgaz, F. (1996). OILCROP-SUN : A development, growth, and yield model of the sunflower crop. *Agronomie Journal*, 88: 403-415.
- Wahl, T. L., Clemmens, A. J., Replogle, J. A., & Bos, M. G. (2005). Simplified design of flumes and weirs. *Irrigation and Drainage*, 54 : 231-247.
- Walker, W.R., & Humpherys, A.S. (1983). Kinematic wave furrow irrigation model. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 116(3) : 299-318.
- Watson, L., & Dallwitz, M. J. (1992). The families of flowering plants : descriptions, illustrations, identifications, and information retrieval. Version : 15 octobre 1998 [Http://biodiversity.uno.edu/delta/](http://biodiversity.uno.edu/delta/).
- White, I., & Sully, J. (1987). Macroscopic and microscopic capillarity length and timescale from filed infiltration. *Water Resour. Res.*, 23 : 1514-1522.
- Woodhiser, D.A., & Liggett, J.A. (1967). Unsteady, one-dimensional flow over a plane : the rising hydrograph, *Water Resour. Res.*, 3(3) : 753-771.
- Yair, A., & Lavee, H. (1985). Runoff generation in arid and semiarid zones. In Anderson. M. G., Burt. T.P (Eds). *Hydrological Forecasting*. Wiley, Newyork.
- Zaffaroni, E., & Chneider, A. A. (1989). Water use efficiency and light interception of semi-dwarf and standart-height sunflower hybrids grown in different row arrangements. *Agron. J.*, 81 : 831-86.

- Zeraouli, M. (1999). Etude de l'impact des systèmes de drainage sur les régimes salins des sols lourds du Gharb. Cas de la station expérimentale de Souk Tleta. Séminaire Euro-Méditerranéen, 27-29 Octobre 1999 Rabat, Maroc.
- Zhang, W., & Cundy, T.W. (1989). Modelling of two dimensional overland flow. *Water Resour. Res.*, 25(9) : 2019-2035.
- Zimmer, D. (2001). Conséquences du drainage et des nappes superficielles pour l'agriculture et l'environnement. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches. Université Pierre et Marie Curie, 50-72.
- Zimmer, D., & Bouarfa, S. (2006). Drainage et assainissement des périmètres irrigués. In : *Traité d'irrigation*, Paris, pp. 768-796.
- Zimmer, D., Hammani, A., Bouarfa, S., & Taky, A. (1999). Conception du drainage dans le périmètre du Gharb. Séminaire Euro-Méditerranéen, 27-29 Octobre 1999 Rabat, Maroc.



## ANNEXES

## Annexe I : Localisation des parcelles objet des expérimentations



## Annexe II : Analyses statistiques

### Comparaison des rendements de la parcelle nivelée dotée de raies et parcelle nivelée sans raies

Nous avons chaque année le rendement de parcelle nivelée avec raies et celui de la parcelle nivelée sans raies déterminés à la base des échantillons prélevés sur des placettes de 2 mètres carrées de surface :

L'hypothèse H0 : Rendement parcelle nivelée raies = parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement parcelle nivelée raies  $\neq$  rendement parcelle nivelée sans nivelée et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{NR} - \bar{X}_{NSR}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{NR}} + \frac{1}{N_{NSR}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{NR}S_{NR}^2 + N_{NSR}^2S_{NSR}^2}{N_{NR} + N_{NSR} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{NR}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle nivelée avec raies

$\bar{X}_{NSR}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle nivelée avec raies

$N_{NR}$  = nombre échantillons parcelle nivelée avec raies

$N_{NSR}$  = nombre échantillons parcelles nivelée sans raies

$s_{NR}$  = écart type de la parcelle nivelée avec raies

$s_{NSR}$  = écart type de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 04/05 | 05/06 |
|-----------------------|-------|-------|
| $\sigma$              | 2.25  | 6.83  |
| t                     | 17.04 | 2.40  |
| Nombre d'échantillons | 30    | 30    |
| Conclusion            |       |       |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.76 à 2.76.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle -  $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 28degré de liberté l'intervalle -2.05 à 2.05

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 05/06 :**

$\bar{X}_{NR}$  = 98.45 T/ha

$\bar{X}_{NSR}$  = 92.43 T/ha

$N_{NR}$  = 15

$N_{NSR}$  = 15

$s_{NR}$  = 4

$s_{NSR}$  = 8.44

hypothèse acceptée au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 04/05 :**

$$\bar{X}_{NR} = 83 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{NSR} = 69 \text{ T/ha}$$

$$N_{NR} = 15$$

$$N_{NSR} = 15$$

$$s_{NR} = 2$$

$$s_{NSR} = 2.3$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## Comparaison parcelle nivelée sans raies et parcelle non nivelée

Nous avons chaque année le rendement de parcelle nivelée avec raies et celui de la parcelle nivelée sans raies déterminés à la base des échantillons prélevés sur des placettes de 2 mètres carrées de surface :

L'hypothèse H0 : Rendement parcelle nivelée raies = parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement parcelle nivelée raies  $\neq$  rendement parcelle nivelée sans nivelée et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{NSR} - \bar{X}_{NN}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{NSR}} + \frac{1}{N_{NN}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{NSR} S_{NSR}^2 + N_{NN}^2 S_{NN}^2}{N_{NSR} + N_{NN} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{NSR}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle nivelée sans raies

$\bar{X}_{NN}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle non nivelée sans raies

$N_{NSR}$  = nombre échantillons parcelle nivelée avec raies

$N_{NN}$  = nombre échantillons parcelles nivelée sans raies

$s_{NSR}$  = écart type de la parcelle nivelée sans raies

$s_{NN}$  = écart type de la parcelle non nivelée sans raies

|                       | 04/05             | 05/06             |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| $\sigma$              | 9.42              | 16.62             |
| t                     | 3.52              | 13.75             |
| Nombre d'échantillons | 25                | 25                |
| Conclusion            | Hypothèse rejetée | Hypothèse rejetée |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , avec  $v = (N_{NSR} + N_{NN} - 2) = 23$  nombre degré de liberté pour notre cas correspondant à l'intervalle -2.23 à 2.23.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle -  $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 23degré de liberté l'intervalle -2.07 à 2.07

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 05/06 :**

$\bar{X}_{NR} = 92.43$  T/ha

$\bar{X}_{NSR} = 54.32$  T/ha

$N_{NR} = 15$

$N_{NSR} = 10$

$s_{NR} = 8.44$  T/ha

$s_{NSR} = 23$  T/ha

hypothèse rejetée au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 04/05 :**

$$\bar{X}_{NR} = 69.15 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{NSR} = 55.60 \text{ T/ha}$$

$$N_{NR} = 15$$

$$N_{NSR} = 10$$

$$s_{NR} = 2.34 \text{ T/ha}$$

$$s_{NSR} = 14 \text{ T/ha}$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Analyse des rendements**  
**Comparaison des rendements de la parcelle nivelée sans raies**  
**(Point hauts – Points bas)**

Pour les trois campagnes expérimentales menées à la SEHA de Souk Tlet, nous disposons des rendements des 5 placettes points hauts et 5 placettes points bas de la parcelle non nivelée. Le tableau suivant relate les rendements des différentes positions, l'écart type et le coefficient de variation.

| Campagne     | 2003/04       |                         |           | 2004/05       |                         |           | 2005/06       |                         |           |
|--------------|---------------|-------------------------|-----------|---------------|-------------------------|-----------|---------------|-------------------------|-----------|
|              | Rdt<br>(T/Ha) | Ecart<br>type<br>(T/ha) | Cv<br>(%) | Rdt<br>(T/Ha) | Ecart<br>type<br>(T/ha) | Cv<br>(%) | Rdt<br>(T/Ha) | Ecart<br>type<br>(T/ha) | Cv<br>(%) |
| Points hauts | 76.57         | 3.15                    | 4         | 73.32         | 2.82                    | 3.85      | 90.20         | 3.27                    | 3.6       |
| Points bas   | 36.65         | 13.58                   | 37        | 37.9          | 10.41                   | 28        | 19.40         | 2.07                    | 10.6      |
| Moyenne      | 56.61         | 22.98                   | 40        | 55.61         | 20.07                   | 36        | 92            | 37.40                   | 68        |

Rdt : rendement

Il ressort du tableau ci-dessus que les écarts types des points bas pour les différentes campagnes restent élevés mais à part pour celui de la campagne 2005/06, campagne pluvieuse où les graines et les plantules ont souffert de l'excès d'eau et où le rendement est le plus faible des trois campagnes. Les coefficients des variations obtenus varient entre 36 et 68% témoignant d'une grande hétérogénéité des betteraves.

### Comparaison des rendements de la parcelle nivelée sans raies (Amont – Milieu)

Pour les deux campagnes expérimentales ou cette pratique a été testée à la SEHA de Souk Tlet, nous disposons des rendements des différentes placettes de la parcelle nivelée dotée de raies. En fait, nous avons le rendement de 5 placettes amont, 5 au milieu et 5 avales. Nous voulons analyser l'impact de la position sur le rendement au niveau de cette pratique d'irrigation. Nous avons constaté que pour l'ensemble des campagnes expérimentales, les rendements moyens du milieu sont les plus faibles. Le tableau suivant relate les rendements des différentes positions, l'écart type et le coefficient de variation.

| Campagne | 2004/05       |                         |           | 2005/06       |                         |           |
|----------|---------------|-------------------------|-----------|---------------|-------------------------|-----------|
|          | Rdt<br>(T/Ha) | Ecart<br>type<br>(T/ha) | Cv<br>(%) | Rdt<br>(T/Ha) | Ecart<br>type<br>(T/ha) | Cv<br>(%) |
| Amont    | 69.85         | 3.42                    | 4.9       | 94.40         | 2.51                    | 2.6       |
| Milieu   | 61.82         | 1.34                    | 2.17      | 86.70         | 5.91                    | 6.8       |
| Aval     | 75.82         | 3.46                    | 4.1       | 97.26         | 3.59                    | 3.7       |
| Moyenne  | 69.12         | 6.43                    | 9.3       | 92            | 6.07                    | 6.5       |

Rdt : rendement

Nous allons comparer les rendements des placettes de l'amont avec ceux du milieu de la parcelle. L'hypothèse H0 : Rendement de l'amont de la parcelle nivelée sans raies = rendement du milieu de la parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux positions

L'hypothèse H1 : Rendement de l'amont de la parcelle nivelée sans raies  $\neq$  rendement du milieu de la parcelle nivelée sans raies et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{AN} - \bar{X}_{MN}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{AN}} + \frac{1}{N_{MN}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{AN} S_{AN}^2 + N_{MN} S_{MN}^2}{N_{AN} + N_{MN} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{AN}$  = rendement moyen obtenu au niveau de l'amont de la parcelle nivelée sans raies

$\bar{X}_{MN}$  = rendement moyen obtenu au niveau du milieu la parcelle nivelée sans raies

$N_{AN}$  = nombre échantillons amont de la parcelle nivelée sans raies

$N_{MN}$  = nombre échantillons milieu de la parcelles nivelée sans raies

$S_{AN}$  = écart type des rendements obtenus à l'amont de la parcelle nivelée sans raies

$S_{MN}$  = écart type des rendements obtenus au milieu de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2004/05            | 2005/06            |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma$              | 2.68               | 4.69               |
| t                     | 22.40              | 12.29              |
| Nombre d'échantillons | 30                 | 30                 |
| Conclusion            | Rejet<br>hypothèse | rejet<br>hypothèse |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse  $H_0$  est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.76 à 2.76.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse  $H_0$  est rejetée si t est en dehors de l'intervalle -  $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 28degré de liberté l'intervalle -2.05 à 2.05

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse  $H_0$  est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 2004/05 :**

$$\bar{X}_{AN} = 69.85 \text{ T/Ha}$$

$$\bar{X}_{MN} = 61.82 \text{ T/Ha}$$

$$N_{AN} = 15$$

$$N_{MN} = 15$$

$$S_{AN} = 3.42 \text{ T/Ha}$$

$$S_{MN} = 1.34 \text{ T/Ha}$$

Hypothèse rejetée au risque de 1%

Hypothèse rejetée au risque de 5%

**Année 2005/06 :**

$$\bar{X}_{AN} = 94.40 \text{ T/Ha}$$

$$\bar{X}_{MN} = 86.70 \text{ T/Ha}$$

$$N_{AN} = 15$$

$$N_{MN} = 15$$

$$S_{AN} = 2.51 \text{ T/Ha}$$

$$S_{MN} = 5.91 \text{ T/Ha}$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%

Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

### Comparaison des rendements de la parcelle nivelée sans raies (Amont – Aval)

Etant donnée que les rendements de la partie amont sont supérieures à ceux du milieu et du fait que les différences sont très significatives entre les deux positions, nous allons comparer ceux de l'amont à ceux de l'aval qui leurs sont supérieurs.

L'hypothèse H0 : Rendement de l'amont de la parcelle nivelée sans raies = rendement du de l'aval de la parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux positions

L'hypothèse H1 : Rendement de l'amont de la parcelle nivelée sans raies  $\neq$  rendement de l'aval de la parcelle nivelée sans raies et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{AN} - \bar{X}_{AvN}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{AN}} + \frac{1}{N_{AvN}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{AN} S_{AN}^2 + N_{AvN} S_{AvN}^2}{N_{AN} + N_{AvN} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{AN}$  = rendement moyen obtenu au niveau de l'amont de la parcelle nivelée sans raies

$\bar{X}_{AvN}$  = rendement moyen obtenu au niveau de l'aval de la parcelle nivelée sans raies

$N_{AN}$  = nombre échantillons amont de la parcelle nivelée sans raies

$N_{AvN}$  = nombre échantillons milieu de la parcelle nivelée sans raies

$S_{AN}$  = écart type des rendements obtenus à l'amont de la parcelle nivelée sans raies

$S_{AvN}$  = écart type des rendements obtenus au milieu de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2004/05            | 2005/06            |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma$              | 3.56               | 3.20               |
| t                     | -12.57             | -13.96             |
| Nombre d'échantillons | 30                 | 30                 |
| Conclusion            | Rejet<br>hypothèse | rejet<br>hypothèse |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.76 à 2.76.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle - $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 28degré de liberté l'intervalle -2.05 à 2.05

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 2004/05 :**

$\bar{X}_{AN}$  = 69.85 T/Ha

$\bar{X}_{AvN}$  = 75.82 T/Ha

$N_{AN}$  = 15

$N_{AvN}$  = 15

$S_{AN}$  = 3.42 T/Ha

$S_{AvN}$  = 3.46 T/Ha

Hypothèse rejetée au risque de 1%  
Hypothèse rejetée au risque de 5%

**Année 2005/06 :**

$$\bar{X}_{AN} = 94.40 \text{ T/Ha}$$

$$\bar{X}_{AvN} = 97.26 \text{ T/Ha}$$

$$N_{AN} = 15$$

$$N_{AvN} = 15$$

$$S_{AN} = 2.51 \text{ T/Ha}$$

$$S_{AvN} = 3.59 \text{ T/Ha}$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## Analyse statistique des rendements

### Comparaison des rendements de la parcelle nivelée dotée de raies (Amont – Milieu)

Nous avons chaque année le rendement des différentes placettes de la parcelle nivelée dotée de raies. En fait, nous avons le rendement de 5 placettes amont, 5 au milieu et 5 aval. Nous voulons analyser l'impact de la position sur le rendement. Nous avons constaté que pour l'ensemble des campagnes expérimentales, les rendements moyens par position augmentent de l'amont vers l'aval. Le tableau suivant relate les rendements des différentes positions, l'écart type et le coefficient de variation.

| Campagne | 2003/04    |                   |        | 2004/05    |                   |        | 2005/06    |                   |        |
|----------|------------|-------------------|--------|------------|-------------------|--------|------------|-------------------|--------|
|          | Rdt (T/Ha) | Ecart type (T/ha) | Cv (%) | Rdt (T/Ha) | Ecart type (T/ha) | Cv (%) | Rdt (T/Ha) | Ecart type (T/ha) | Cv (%) |
| Amont    | 68.71      | 2.64              | 3.84   | 78.86      | 3.08              | 3.9    | 94.8       | 2.58              | 2.7    |
| Milieu   | 69.22      | 3.43              | 4.9    | 81.46      | 2.64              | 3.2    | 98.2       | 3.96              | 4      |
| Aval     | 73.22      | 2.15              | 2.9    | 89.32      | 3.51              | 3.6    | 103.75     | 3.86              | 3.7    |
| Moyenne  | 70.38      | 3.32              | 4.7    | 83.26      | 5.44              | 6.5    | 98.57      | 4.9               | 4.9    |

Rdt : rendement

Nous allons comparer les rendements des placettes de l'amont avec ceux du milieu de la parcelle. Selon le test de Student, l'hypothèse H0 : Rendement de l'amont de la parcelle dotée de raies = rendement du milieu de la parcelle nivelée dotée de raies et il n'y a pas de différence entre les deux positions

L'hypothèse H1 : Rendement de l'amont de la parcelle nivelée raies  $\neq$  rendement du milieu de la parcelle nivelée et il y a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{MG} - \bar{X}_{AvG}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{MG}} + \frac{1}{N_{AvG}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{MG} S_{MG}^2 + N_{AvG} S_{AvG}^2}{N_{MG} + N_{AvG} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{AG}$  = rendement moyen obtenu au niveau de l'amont de la parcelle nivelée avec raies

$\bar{X}_{MG}$  = rendement moyen obtenu au niveau du milieu la parcelle nivelée avec raies

$N_{AG}$  = nombre échantillons amont de la parcelle nivelée avec raies

$N_{MG}$  = nombre échantillons milieu de la parcelle nivelée sans raies

$S_{AG}$  = écart type des rendements obtenus à l'amont de la parcelle nivelée avec raies

$S_{AvG}$  = écart type des rendements obtenus au milieu de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2003/04 | 2004/05 | 2005/06 |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| $\sigma$              | 3.17    | 2.96    | 3.46    |
| t                     | -1.20   | -7.53   | -7.37   |
| Nombre d'échantillons | 30      | 30      | 30      |
| Conclusion            |         |         |         |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse  $H_0$  est rejeté si  $t$  est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.76 à 2.76.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse  $H_0$  est rejetée si  $t$  est en dehors de l'intervalle - $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.05 à 2.05

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de  $t$  du tableau on conclut que l'hypothèse  $H_0$  est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 2003/04 :**

$$\bar{X}_{AG} = 69.22 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{MG} = 73.22 \text{ T/ha}$$

$$N_{AG} = 15$$

$$N_{MG} = 15$$

$$S_{AG} = 3.43$$

$$S_{MG} = 2.15$$

Hypothèse acceptée au risque de 1%

Hypothèse acceptée au risque de 5%

**Année 04/05 :**

$$\bar{X}_{AG} = 81.46 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{MG} = 89.32 \text{ T/ha}$$

$$N_{AG} = 15$$

$$N_{MG} = 15$$

$$S_{AG} = 2.64$$

$$S_{MG} = 3.51$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%

Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 05/06 :**

$$\bar{X}_{AG} = 98.2 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{MG} = 103.75 \text{ T/ha}$$

$$N_{AG} = 15$$

$$N_{MG} = 15$$

$$S_{AG} = 3.96$$

$$S_{MG} = 3.86$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%

Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

### Comparaison des rendements de la parcelle nivelée sans raies (Milieu – Aval)

Nous avons chaque année le rendement des différentes placettes de la parcelle nivelée dotée de raies. En fait, nous avons le rendement de 5 placettes amont, 5 au milieu et 5 aval ; nous voulons analyser l'impact de la position sur le rendement. Nous allons comparer les rendements des placettes du milieu avec ceux de l'aval de la parcelle. L'hypothèse H0 : Rendement du milieu de la parcelle dotée de raies = rendement de l'aval de la parcelle nivelée dotée de raies et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement du milieu de la parcelle nivelée raies  $\neq$  rendement de l'aval de la parcelle nivelée et il y a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{MG} - \bar{X}_{AvG}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{MG}} + \frac{1}{N_{AvG}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{MG} S_{MG}^2 + N_{AvG} S_{AvG}^2}{N_{MG} + N_{AvG} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{MG}$  = rendement moyen obtenu au niveau du milieu de la parcelle nivelée avec raies

$\bar{X}_{AvG}$  = rendement moyen obtenu au niveau de la parcelle nivelée avec raies

$N_{MG}$  = nombre échantillons milieu de la parcelle nivelée avec raies

$N_{AvG}$  = nombre échantillons aval de la parcelle nivelée sans raies

$S_{MG}$  = écart type des rendements obtenus au milieu de la parcelle nivelée avec raies

$S_{AvG}$  = écart type des rendements obtenus au niveau de l'aval de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2003/04            | 2004/05            | 2005/06            |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\sigma$              | 2.96               | 3.21               | 3.58               |
| t                     | -10.12             | -18.33             | -11.60             |
| Nombre d'échantillons | 30                 | 30                 | 30                 |
| Conclusion            | Rejet<br>hypothèse | Rejet<br>hypothèse | Rejet<br>hypothèse |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas à 28 degré de liberté l'intervalle -2.76 à 2.76.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle -  $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 28degré de liberté l'intervalle -2.05 à 2.05

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 2003/04 :**

$\bar{X}_{MG}$  = 69.22 T/ha

$\bar{X}_{AvG}$  = 73.22 T/ha

$N_{MG}$  = 15

$N_{AvG}$  = 15

$S_{MG}$  = 3.43

$S_{AvG}$  = 2.15

Hypothèse acceptée au risque de 1%  
Hypothèse acceptée au risque de 5%

**Année 04/05 :**

$$\bar{X}_{MG} = 81.46 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{AvG} = 89.32 \text{ T/ha}$$

$$N_{MG} = 15$$

$$N_{AvG} = 15$$

$$S_{MG} = 2.64$$

$$S_{AvG} = 3.51$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 05/06 :**

$$\bar{X}_{MG} = 98.2 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{AvG} = 103.75 \text{ T/ha}$$

$$N_{MG} = 15$$

$$N_{AvG} = 15$$

$$S_{MG} = 3.96$$

$$S_{AvG} = 3.86$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## Comparaison des rendements en sucre de la parcelle nivelée dotée de raies et parcelle nivelée sans raies

Nous avons chaque année le rendement en sucre brut de parcelle nivelée avec raies et celui de la parcelle nivelée sans raies déterminés à la base des échantillons prélevés sur des placettes de 2 mètres carrées de surface :

L'hypothèse H0 : Rendement en sucre brut de la parcelle nivelée dotée raies = rendement en sucre brut de la parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement parcelle nivelée dotée de raies  $\neq$  rendement parcelle nivelée sans raies et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{NR} - \bar{X}_{NSR}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{NR}} + \frac{1}{N_{NSR}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{NR}S_{NR}^2 + N_{NSR}^2S_{NSR}^2}{N_{NR} + N_{NSR} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{NR}$  = rendement en sucre brut moyen obtenu sur la parcelle nivelée avec raies

$\bar{X}_{NSR}$  = rendement en sucre brut moyen obtenu sur la parcelle nivelée sans raies

$N_{NR}$  = nombre échantillons parcelle nivelée dotée raies

$N_{NSR}$  = nombre échantillons parcelles nivelée sans raies

$S_{NR}$  = écart type de la parcelle nivelée dotée de raies

$S_{NSR}$  = écart type de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2004/05 | 2005/06 |
|-----------------------|---------|---------|
| $\sigma$              | 0.93    | 0.53    |
| t                     | 5.06    | 5.16    |
| Nombre d'échantillons | 18      | 18      |
| Conclusion            |         |         |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle  $-t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas ( $N_{NR} + N_{NSR} - 2$ ) soit ( $9+9-2 = 16$ ) à 16 degré de liberté l'intervalle -2.92 à 2.92.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle  $-t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 16 degré de liberté l'intervalle -2.12 à 2.12

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 04/05 :**

$\bar{X}_{NR} = 13.79$  T/ha

$\bar{X}_{NSR} = 11.57$  T/ha

$N_{NR} = 9$

$N_{NSR} = 9$

$S_{NR} = 0.89$  T/ha

$S_{NSR} = 0.87$  T/ha

Hypothèse rejetée au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 2005/06 :**

$$\bar{X}_{NR} = 15.22 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{NSR} = 13.59 \text{ T/ha}$$

$$N_{NR} = 9$$

$$N_{NSR} = 9$$

$$s_{NR} = 0.45$$

$$s_{NSR} = 0.56$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## Comparaison des rendements en sucre de la parcelle nivelée sans raies et de la parcelle non nivelée

Nous avons chaque année le rendement en sucre brut de parcelle nivelée sans raies et celui de la parcelle non nivelée déterminés à la base des échantillons prélevés sur des placettes de 2 mètres carrées de surface :

L'hypothèse H0 : Rendement en sucre brut de la parcelle nivelée sans raies = rendement en sucre brut de la parcelle non nivelée et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement parcelle nivelée sans raies  $\neq$  rendement parcelle non nivelée et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{NSR} - \bar{X}_{NN}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{NSR}} + \frac{1}{N_{NN}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{NSR} S_{NSR}^2 + N_{NN}^2 S_{NN}^2}{N_{NSR} + N_{NN} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{NN}$  = rendement en sucre brut moyen obtenu sur la parcelle non nivelée

$\bar{X}_{NSR}$  = rendement en sucre brut moyen obtenu sur la parcelle nivelée sans raies

$N_{NN}$  = nombre échantillons parcelle nivelée dotée raies

$N_{NSR}$  = nombre échantillons parcelles nivelée sans raies

$s_{NN}$  = écart type de la parcelle nivelée dotée de raies

$s_{NSR}$  = écart type de la parcelle nivelée sans raies

|                       | 2004/05 | 2005/06 |
|-----------------------|---------|---------|
| $\sigma$              | 0.96    | 0.53    |
| t                     | 3.81    | 20.52   |
| Nombre d'échantillons | 15      | 15      |
| Conclusion            |         |         |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle –  $t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , ce qui donne pour notre cas ( $N_{NN} + N_{NSR} - 2$ ) soit (6+9-2 =13 ) à 13 degré de liberté l'intervalle -3.01 à 3.01.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle -  $t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 13 degré de liberté l'intervalle -2.16 à 2.16

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 2004/05 :**

$\bar{X}_{NN}$  = 9.63 T/ha

$\bar{X}_{NSR}$  = 11.57 T/ha

$N_{NN}$  = 6

$N_{NSR}$  = 9

$s_{NN}$  = 0.94 T/ha

$s_{NSR}$  = 0.87 T/ha

Hypothèse rejetée au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 2005/06 :**

$$\bar{X}_{NN} = 8.27 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{NSR} = 13.93 \text{ T/ha}$$

$$N_{NN} = 6$$

$$N_{NSR} = 9$$

$$s_{NN} = 0.35$$

$$s_{NSR} = 0.56$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## Comparaison parcelle nivelée sans raies et parcelle non nivelée

Nous avons chaque année le rendement de parcelle nivelée avec raies et celui de la parcelle nivelée sans raies déterminés à la base des échantillons prélevés sur des placettes de 2 mètres carrées de surface :

L'hypothèse H0 : Rendement parcelle nivelée raies = parcelle nivelée sans raies et il n'y a pas de différence entre les deux systèmes d'irrigation

L'hypothèse H1 : Rendement parcelle nivelée raies  $\neq$  rendement parcelle nivelée sans nivelée et il y'a une différence entre les moyennes.

Avec l'hypothèse H0 :

$$t = \frac{\bar{X}_{NSR} - \bar{X}_{NN}}{\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{NSR}} + \frac{1}{N_{NN}}}} \quad \text{où } \sigma = \sqrt{\frac{N_{NSR} S_{NSR}^2 + N_{NN}^2 S_{NN}^2}{N_{NSR} + N_{NN} - 2}}$$

Avec  $\bar{X}_{NSR}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle nivelée sans raies

$\bar{X}_{NN}$  = rendement moyen obtenu sur la parcelle non nivelée sans raies

$N_{NSR}$  = nombre échantillons parcelle nivelée avec raies

$N_{NN}$  = nombre échantillons parcelles nivelée sans raies

$s_{NSR}$  = écart type de la parcelle nivelée sans raies

$s_{NN}$  = écart type de la parcelle non nivelée sans raies

|                       | 04/05             | 05/06             |
|-----------------------|-------------------|-------------------|
| $\sigma$              | 9.42              | 16.62             |
| t                     | 3.52              | 13.75             |
| Nombre d'échantillons | 25                | 25                |
| Conclusion            | Hypothèse rejetée | Hypothèse rejetée |

Au risque de première espèce 1% l'hypothèse H0 est rejeté si t est en dehors de l'intervalle  $-t_{0.995}$  à  $t_{0.995}$ , avec  $v = (N_{NSR} + N_{NN} - 2) = 23$  nombre degré de liberté pour notre cas correspondant à l'intervalle -2.23 à 2.23.

Au risque de première espèce 5% l'hypothèse H0 est rejetée si t est en dehors de l'intervalle  $-t_{0.975}$  à  $t_{0.975}$  ce qui donne pour notre cas à 23degré de liberté l'intervalle -2.07 à 2.07

D'après les intervalles sus indiqués et les valeurs de t du tableau on conclut que l'hypothèse H0 est rejetée et qu'il existe une différence significative entre les rendements des deux systèmes d'irrigation.

**Année 05/06 :**

$\bar{X}_{NR} = 92.43$  T/ha

$\bar{X}_{NSR} = 54.32$  T/ha

$N_{NR} = 15$

$N_{NSR} = 10$

$s_{NR} = 8.44$  T/ha

$s_{NSR} = 23$  T/ha

Hypothèse rejetée au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

**Année 04/05 :**

$$\bar{X}_{NR} = 69.15 \text{ T/ha}$$

$$\bar{X}_{NSR} = 55.60 \text{ T/ha}$$

$$N_{NR} = 15$$

$$N_{NSR} = 10$$

$$s_{NR} = 2.34 \text{ T/ha}$$

$$s_{NSR} = 14 \text{ T/ha}$$

Rejet de l'hypothèse au risque de 1%  
Rejet de l'hypothèse au risque de 5%

## SUBMERSION DES GRAINES DE BETTERAVE A SUCRE

Afin de bien appréhender l'effet des submersions sur les graines de la betterave à sucre, nous avons eu recours à l'utilisation de pots. 6 traitements ont fait l'objet de l'étude et ont porté sur : sans submersion, submersion du quatre, huit, dix et quinze jours. Pour chaque traitement, 5 pots portant sur 20 graines de betteraves ont été soumis au test. Les moyennes obtenues sont relatées ci-dessous :

Moyenne de 5 pots sans submersion =  $m_1 = 18.8$

Moyenne de 5 pots submersion 1 jour =  $m_2 = 20$

Moyenne de 5 pots submersion 4jour =  $m_3 = 20$

Moyenne de 5 pots submersion 8 jour =  $m_4 = 12.8$

Moyenne de 5 pots submersion 10 jour =  $m_5 = 7.6$

Moyenne de 5 pots submersion 15 jour =  $m_6 = 9$

L'application du test de Newman Keuls a fait ressortir que :

$m_2 = m_3$  et don appartiennent au même groupe

$m_1 < m_2 = m_3 < m_4 < m_5 < m_6$

Le calcul des différences moyennes donne :

$$|m_3 - m_2| = 0$$

$$|m_3 - m_1| = 1.2 \qquad |m_4 - m_5| = 5.2$$

$$|m_3 - m_4| = 7.2 \qquad |m_4 - m_6| = 3.8$$

$$|m_3 - m_5| = 12.4 \qquad |m_5 - m_6| = 1.4$$

$$|m_3 - m_6| = 11$$

La table de Newman Keuls donne pour :

K : nombre de moyennes : 6

$$N_v = (N-1) - [(C-1) + (R+1)] = 19$$

N : étant l'effectif total = 30

C : étant le nombre de colonnes où nombre de traitements : 6

R : étant le nombre de rangés correspondant au nombre de pots pour notre cas = 5

Pour notre cas : la valeur correspondante sur la table est : 4.45

En comparant la différence des moyennes en valeurs absolues entre  $|m_3 - m_2| = 0$  et  $|m_3 - m_1| = 1.2$  celles-ci sont inférieures à 4.45 lue sur la table de Newman Keuls et donc on n'a pas de différence entre  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$  mais des différences significatives existent avec les 3 moyennes restantes. L'analyse des trois moyennes donnera ce qui donnera :

$K = 3$

$v = 19$  La valeur correspondante est de 3.58

On constate que  $|m_4 - m_5| = 5.2$  et  $|m_4 - m_6| = 3.8$  sont supérieures à 3.58 ce qui signifie qu'il existe une différence entre  $m_4$  d'une part et  $m_5$  et  $m_6$  d'autre part.

Pour  $K = 2$

$v = 19$  La valeur correspondante est de 2.96

La différence de  $|m_5 - m_6| = 1.4$  est inférieure à 2.96 ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence entre les deux séries.

En conclusion, on peut conclure que notre expérimentation nous obtenons trois groupes distincts à savoir :

Groupe 1 : Sans submersion, submersion 1 et submersion de 4 jours ;

Groupe 2 : Submersion de 8 jours

Groupe 3 : Submersion de 10 jours

## SUBMERSION DES PLANTULES DE BETTERAVE A SUCRE

Afin de bien appréhender l'effet des submersions sur les plantules de la betterave à sucre, nous avons eu recours à l'utilisation de pots. 5 traitements ont fait l'objet de l'étude et ont porté sur : submersion du quatre jours, submersion de huit jours, submersion de dix jours et submersion de quinze jours. Pour chaque traitement, 5 pots portant vingt plantules au stade de six feuilles vraies et n'ayant subi aucun stress d'excès d'eau auparavant ont été soumis au test. L'expérience consistait en comptage des plantules asphyxiées suite à ces durées de submersion. Les moyennes obtenues sont relatées ci-dessous :

Moyenne de 5 pots submersion 4jour =  $m_1 = 0$

Moyenne de 5 pots submersion 8 jour =  $m_2 = 0$

Moyenne de 5 pots submersion 10 jour =  $m_3 = 0.6$

Moyenne de 5 pots submersion 15 jour =  $m_4 = 7.2$

Moyenne de 5 pots submersion 1 jour =  $m_5 = 10.6$

L'application du test de Newman Keuls a fait ressortir que :

$m_1 = m_2$  et donc appartiennent au même groupe

$m_1 = m_2 < m_3 < m_4 < m_5$

Le calcul des différences moyennes donne :

$$|m_3 - m_2| = 0.6 \qquad |m_3 - m_5| = 10$$

$$|m_3 - m_1| = 1.2 \qquad |m_4 - m_5| = 3.4$$

$$|m_3 - m_4| = 6.6$$

La table de Newman Keuls donne pour :

K : nombre de moyennes : 5

$$N_v = (N-1) - [(C-1) + (R+1)] = (25-1) - [(5-1) + (5+1)] = 16$$

N : étant l'effectif total = 25

C : étant le nombre de colonnes où nombre de traitements correspondant aux durées de submersions : 5

R : étant le nombre de rangés correspondant au nombre de pots pour notre cas = 5

Pour notre cas : la valeur correspondante sur la table est : 4.43

Ce qui donne qu'il y'a pas de différences entre  $m_1$ ,  $m_2$  et  $m_3$  et il n y a pas de différence entre  $m_4$  et  $m_5$ .

Avec  $k = 3$  , on comparera les moyenne de  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$

$$K = 3$$

$v = 16$  La valeur correspondante est de 3.65

$$|m_3 - m_2| = 0.6$$

$$|m_3 - m_1| = 1.2 \quad |m_4 - m_5| = 3.4$$

$$|m_3 - m_4| = 6.6$$

On constate que  $|m_3 - m_4| = 6.6$  et  $|m_3 - m_5| = 10$  sont supérieures à 3.65 ce qui signifie qu'il existe une différence entre  $m_3$  d'une part et  $m_5$  et  $m_6$  d'autre part.

Pour  $K = 2$

$v = 16$  La valeur correspondante est de 3

La différence de  $|m_4 - m_5| = 3.4$  supérieure à 3 ce qui signifie qu'il y'a une différence entre les deux séries.

En conclusion, on peut conclure que pour notre expérimentation nous obtenons trois groupes distincts à savoir :

Groupe 1 : submersion 4 et submersion de 8 jours et 10 jours ;

Groupe 2 : Submersion de 15 jours

Groupe 3 : Submersion de 20 jours

### Annexe III

#### Appendix: calculation of the derivatives $dA/dy$ and $dQ/dy$

In a cross section, assumed trapezoidal, water depth is denoted  $y$ , bottom width is denoted  $B$  and side slope is denoted  $m$ . The wetted area is given by:

$$A = (B + my)y \quad . \quad (A1)$$

The derivation  $A' = dA/dy$  is straightforward:

$$A' = B + 2my \quad . \quad (A2)$$

The wetted perimeter  $P$  is given by:

$$P = B + 2\sigma y \quad , \quad (A3)$$

where  $\sigma = (1+m^2)^{1/2}$  and the hydraulic radius  $R_h = A/P$ . From Equation (10), one gets  $Q$  as a function of  $y$ :

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} \sqrt{S_0} = \frac{1}{n} (By + my^2)^{5/3} (B + 2\sigma y)^{-2/3} \sqrt{S_0} \quad , \quad (A4)$$

and then its derivative  $Q' = dQ/dy$ :

$$Q' = \frac{\sqrt{S_0}}{3n} \left[ 5(B + 2my) \left( \frac{By + my^2}{B + 2\sigma y} \right)^{2/3} - 4\sigma \left( \frac{By + my^2}{B + 2\sigma y} \right)^{5/3} \right] \quad . \quad (A5)$$

After a few algebraic manipulations, we get

$$Q' = \frac{\sqrt{S_0}}{3n} \left( \frac{By + my^2}{B + 2\sigma y} \right)^{2/3} \left[ \frac{5B^2 + 6B\sigma y + 10Bmy + 16m\sigma y^2}{B + 2\sigma y} \right] \quad . \quad (A6)$$

#### **Annexe IV : Le générateur de paramètres PG pour la simulation de l'irrigation à la raie à l'échelle de la parcelle (Mailhol *et al.*, 2005)**

Considérant que l'avancement et l'infiltration sont deux processus intimement liés (Elliot and Walker, 1982 ; Pimentel 1987 ; Renault and Wallender 1992 ; Mailhol and Gonzalez 1993 ; Shepard *et al.*, 1993). Le générateur de paramètres repose sur l'hypothèse que les sources de variabilité affectant le processus d'avancement sont étroitement liées à celles conditionnant l'infiltration. Dans les parcelles nivelées au Laser, nous pouvons supposer que les sources de variabilités résultent principalement de l'infiltration et du débit d'alimentation. (Schwankl *et al.*, 2000).

Deux contextes différents ont permis de mettre en œuvre le PG. Ce sont les parcelles expérimentales de Lavalette à Montpellier (France) et une parcelle proche de Tarascon (France) sous couvert de maïs. L'analyse du processus de l'avancement a été réalisée pour chaque irrigation à l'échelle de un jeu N-raies (N#30 raies) où le débit de l'alimentation de chaque raie a été mesuré. Avant chaque irrigation, un profil d'humidité a été établi pour des sites spécifiques à l'intérieur de la parcelle. La valeur de  $\Delta\theta$  utilisée dans l'équation 4 et déterminé pour le site situé au milieu de la parcelle est attribué à l'ensemble des N raies. A partir de N ( $\lambda_c$ ,  $K_s$ ) couples tirés du calage de RAIEOPT sur la trajectoire d'avancement, comme expliqué dans Mailhol (2003), moyennes et coefficients de variation (CV) sont aussi calculées. A partir de cette analyse, les résultats suivant sont obtenus :

- (a) les N débits d'alimentation pour une irrigation donnée s'ajustent à une loi gaussienne de même que N valeurs de  $\lambda_c$  et  $K_s$ .
- (b) une relation de corrélation entre  $\lambda_c$  et  $K_s$ . peut être établie.
- (c) L'impact de la compaction chacune des autres raies par les roues de tracteur sur la variabilité latérale de l'avancement peut être notable durant la première irrigation.
- (d) Une corrélation croisée de l'avancement entre les autres irrigations peut être mise en lumière quand on a une faible variabilité concernant les débits d'alimentation des raies. (dû à un système efficace de distribution d'eau en tête des raies d'irrigation).

Le caractère aléatoire des variables mises en jeu justifie l'usage d'un générateur de paramètre reposant sur la méthode de Monte-Carlo pour générer les inputs du modèle RAIEOPT. La méthode de Monte-carlo a été appliquée avec succès (simulation satisfaisante du temps moyen d'avancement et de sa variance) dans les sols argileux lourds de la plaine du Gharb Mailhol *et al.*, 1999) où seulement le débit d'alimentation des raies Q et B sont tirés à partir de leur fonction de distribution statistique pour des fins d'évaluation de l'irrigation. La méthode de Monte-Carlo est résumée ci-après :

N valeurs de  $z_i$  de la variable Z sont tirés de la distribution de Gauss pour obtenir :

$$z_i = \mu_z + \sigma_z V_i \quad \text{Equation 1}$$

Où les valeurs de  $V_i$  sont générées par randomisation (RND) tirées dans une loi uniforme entre 0 et 1. Les N valeurs de  $z_i$  générées sont une réalisation d'un processus stochastique. Les valeurs moyennes  $m_z$  et l'écart type  $SD_z$  pour ces réalisations fournit les estimations de  $\mu_z$  et  $\sigma_z$  :

$$m_z = (1/N) \sum z_i \quad SD_z^2 = [1/(N-1)] \sum (z_i - m_z)^2$$

Les études conduites pour d'autres types de sols ont encouragés l'adaptation de la méthode de Monte-Carlo pour répondre aux besoins de SOFIP (Mailhol *et al.*, 2005). En tenant compte (a) du tirage aléatoire des paramètres du modèle d'irrigation est effectué, pour un  $\lambda_c$  tiré assigné à une raie donnée  $i$ , la valeur du paramètre B :  $B_i = 0.9 \lambda_c^i \overline{\Delta \theta}$  peut être calculé en utilisant la moyenne du déficit en eau du sol  $\overline{\Delta \theta}$  tirée à partir de l'ensemble des sous parcelles simillées par PILOTE. L'écart type de  $\overline{B} = 0.9 \overline{\lambda_c} \overline{\Delta \theta}$  est dérivé à partir celui de  $\lambda_c$  laquelle fixé à priori. Selon (b), le Ks tiré est conditionné par  $\lambda_c$  comme suggéré par la tendance clairement visible sur le graphe de corrélation  $\lambda_c$  (Ks) comme démontré plus loin. ce tirage conditionnel est expliqué ci-dessous.

Pour tenir compte de la relation entre deux variables Z et T (tels que  $\lambda_c$  et Ks) des couples de (Z,T) doivent être générés pour N raies par 2N valeurs tirées de la variable aléatoire  $v_{ij}$  de V. Pour une raie donnée,  $(z_i, t_i)$  est défini comme :

$$z_i = m_z + SD_z v_{i1} \quad \text{Equation 2}$$

avec :

$$t_i = m_t + r SD_{v_{i1}} + SD_z \sqrt{(1-r^2)} v_{i2}$$

où

$SD_t^2 (1-r^2)$  Représente la variance T non associée avec la régression linéaire avec Z.

L'impact de la compaction d toutes les autres raies [i.e.(c)] durant la mise en place des raies est notoire sur la variabilité latérale du processus d'avancement. L'infiltration et la rugosité se trouvent réduite par la compaction. L'effet de la compaction, lequel est observé principalement pour la première irrigation, est moins significatif pour les irrigations suivantes (Berthmoé 1991). C'est possible de prendre en considération cette spécificité en proposant des distributions statistiques adaptées pour les paramètres d'infiltration. Par souci de simplicité, les paramètres d'infiltrations sont tirés aléatoirement à partir de la même fonction de distribution bimodale. Une moyenne est attribuée aux raies compactées (mêmes raies) et une

autre pour les raies non compactées (autres raies). Les valeurs du paramètre pour la première irrigation (pour un sol non structuré résultant de l'opération du labour) sont obtenues séparément pour les raies compactées et les raies non compactées. La simulation de l'effet de compaction est optionnelle dans le code source de SOFIP en FORTRAN.

La méthode permettant la simulation du phénomène de la corrélation croisée de l'avancement entre les irrigations suivantes [i.e.(d)] est expliquée ci-dessous. Il est clair que ce phénomène doit d'être pris en compte lors de l'examen de l'un des objectifs du modèle : pour calculer les risques de la percolation profonde résultant d'une pratique d'irrigation. En effet, le fait que des parties de la parcelle sont sur-irriguées (raies rapides) ou sous-irriguées (raies lentes) augmente le risque de drainage local et peut affecter la variabilité des rendements des cultures. La méthode proposée pour tenir compte de la corrélation croisée entre les irrigations ultérieures implique la mémorisation du comportement (où la signature) que les raies ont établies durant la première irrigation. Il est basé sur la classification du temps d'avancement quand l'impact de la variabilité des débits d'alimentation des raies sur sue celle de l'avancement est éliminé avec  $C_v(Q) = 0$ . Le temps d'avancement d'un jeu de N raies est calculé en utilisant les couples ( $\lambda_c$  et  $K_s$ ) sélectionnés par un processus de tirage aléatoire [i.e. (a)+(b)+(c)]. Les raies, caractérisées par leurs numéros et leurs couples ( $\lambda_c$  et  $K_s$ ) sont classées par ordre d'avancement des plus rapides aux plus lentes et ce pour la première irrigation. Pour l'irrigation suivante, une classification similaire est effectuée. Les couples issus de classement de raies basés sur le temps d'avancement sont attribués aux différentes raies selon la hiérarchie établie pour la première irrigation.

## Annexe V : Paramètres des modèles

### 1) Paramètres du modèle de ruissellement

|                        |          |      |
|------------------------|----------|------|
| Inter Raies (m)        | : 1.5    |      |
| Largeur considérée (m) | : 50.    |      |
| Longueur Parcelle (m)  | : 240.0  |      |
| largeur des raies (m)  | : 0.3    |      |
| Pente                  | : 0.002  |      |
| Striklers              | : 5.0    | 35.0 |
| Ksat (cm/h)            | : 0.2    |      |
| hf (cm)                | : 35.0   |      |
| tetas                  | : 0.45   |      |
| tetai                  | : 0.35   |      |
| Capacité au champ      | : 0.36   |      |
| Beta                   | : 0.0001 |      |
| Pdt Pluie              | : 5.0    |      |
| Pdt (s)                | : 1.0    |      |
| Largeur du fossé (m)   | : 1.0    |      |
| Pente fossé            | : 0.005  |      |

## 2) Paramètres du modèle Pilote adapté à la submersion

|                                                              |                      |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|
| and,anf,jds,jfs                                              | :2004 2005 306 575   |
| Fc,ppf(humvol.),Px                                           | :0.35 0.18 1         |
| r=Rfu/Ru , Mulch                                             | :0.55 0.             |
| Accroi. racine m/j                                           | :0.0125              |
| Semis                                                        | :326                 |
| T0 place rac,T°Cri                                           | :400. 28.            |
| Stock hydrique sur z=Px le 1er jour de la simulation         |                      |
| Stock,rc,sat,ksat                                            | :200. .0 0.42 65. 5. |
| hn0,Zdrain,cd,X                                              | :1.39 1.4 0.27 50.0  |
| Macro=b1*teta-b2,s                                           | :100. 0.5 1.3 0.     |
| Kcmax,KSOLmax                                                | :1.05 0.3            |
| laimx,RUE,IRPOT                                              | :5.0 2.3 0.75        |
| tm(flor),ts1,ts2                                             | :1050.0 850.0 1500.  |
| Tmatur,coefstress                                            | :1800.0 2.0          |
| coef. forme LAI                                              | :1.9 0.6 3.4         |
| Impact des excès d'eau sur la BAS (graine)                   |                      |
| Njg=nJgraine seuil=3 jours                                   |                      |
| Njg,rg,rog                                                   | : 3 0.75 0.1 100.    |
| Impact excès d'eau sur la plante                             |                      |
| Npp=nJplantule seuil=9 jours                                 |                      |
| npp,rp,rop,seuilTø                                           | : 9 0.50 0.2 1300.   |
| Temerg,Tbase                                                 | :100.0 6.0           |
| Dens.,DensOPT p/m2                                           | :10.0 10.0           |
| Impact du stress hydrique sur l'indice de récolte            | ( ? oui: irec =1)    |
| Irec,rseuil,pente                                            | :1 2.5 0.15          |
| Humidité racine (%)                                          | :63.0                |
| J récolte but.(JAS)                                          | :250                 |
| Test d'une pratique d'irrigation sur un scénario climatique: | Oui =1, Non=0 :1     |
| IT(1),IM(0),Seuil                                            | :0 60.               |
| Dose semis,doses>                                            | :0. 0.00             |
| Debut Irrigation,Fin Irrigation (JAS)                        | :000,200             |

### 3) Simulation d'une Pratique sur parcelle de betteraves au Gharb (Modèle SOFIP)

|                                        |                                      |
|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Année de récolte                       | :2005                                |
| Jcdeb, Jcfinsimul                      | :306 171                             |
| Sort bil/1mail,no                      | :0 1                                 |
| Paramètre modèle pilote                |                                      |
| Hcc,ppf(huvol),px                      | :0.36 0.18 1.0                       |
| r=Rfu/Ru                               | :0.55                                |
| accroi. racine m/j                     | :0.0125                              |
| date semis                             | :326                                 |
| mise en place rac                      | :400.                                |
| reserve initiale                       | :245                                 |
| laimx,RUE,IRPOT                        | :5.0 2.3 0.75                        |
| Tflor,ts1,ts2                          | :1050.0 850.0 1300.                  |
| Tmatur,coefstress                      | :1750.0 2.0                          |
| coef. forme du LAI                     | :1.5 0.6 3.4                         |
| Kcmax,KSOLmax                          | :1.05 0.3                            |
| Temerg,Tbase                           | :100.0 6.0                           |
| Irec,rseuil,pente                      | :1 2.5 0.15                          |
| Humgrain,Jrecolte                      | :63.0 250                            |
| Densit,, DensOPT                       | :10.0 10.                            |
| Simulation/2années                     | :1                                   |
| Paramètres Modèle d'irrigation RAIEOPT |                                      |
| Param 1er irrig                        | :40.0 0.48                           |
| dc,ks,psi,tetas                        | :40.0 0.30 100. 0.45                 |
| Maning1,Maning >1                      | :0.05 0.04                           |
| Long,S0,Ec,largeur                     | :225.0 0.002 1.5 45.0                |
| Cvdc,CvKs,r(ks,dc)                     | :10.0 10.0 0.2                       |
| LogN:1 ou N: 0                         | :0                                   |
| pasdx placette                         | :10.0                                |
| sortie N ir, Itas                      | : 3 0                                |
| Pertes % hors syst                     | :0.                                  |
| Paramètres conduite des arrosages      |                                      |
| Raie bouchée ib=1                      | :0                                   |
| IR=Arr^t=co*TL,coe                     | :0 1. 1.0                            |
| Pilotage,Niv.epuis                     | :0 55.0 55.0 0.75                    |
| Jdebirri,Jirifin                       | :321 530                             |
| Ifrequence,Pseuil                      | :00 30.0                             |
| Dose requise (mm)                      | :-1.                                 |
| Seuil drainage                         | :50.0                                |
| Nirrig,dates                           | : 6 385 411 460 495 508 525          |
| Débits                                 | :1.3 1.4 1.15 1.2 1.50 1.15          |
| Cv(Débits)                             | :10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0       |
| Durées des arrosages                   | :480.0 300.0 474.0 635.0 370.0 470.0 |
| cut-back,Q2                            | :0 0.                                |
| Q et Cv: F et Pil                      | :1.5 1.5 5.0                         |