



HAL
open science

Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts

J.C. Mailhol

► **To cite this version:**

J.C. Mailhol. Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts. Sciences de l'environnement. Habilitation à Diriger des Recherches, Université Montpellier II, 2005. tel-02583918

HAL Id: tel-02583918

<https://hal.inrae.fr/tel-02583918v1>

Submitted on 14 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.

Académie de Montpellier

Université Montpellier II

Sciences et techniques du Languedoc

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Présenté par

J.C. Mailhol

Le 17 Janvier 2005

Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts

Jury :

Président : Michel Desbordes, professeur UM2

Rapporteur : Luis Peirera, professeur ISA Lisbonne

Rapporteur : Alain Perrier, professeur INAPG

Examineur : Pierre Ribstein, professeur Université Paris VI

Rapporteur : Michel Vauclin, directeur de recherche LTHE Grenoble

Examineur : Daniel Zimmer, directeur de recherche Office Mondial de l'Eau



UR irrigation

Tél : 04 67 04 63 46

Email : jean-claude.mailhol@cemagref.fr

Table

DOSSIER ADMINISTRATIF.....	3
1. Curriculum Vitae.....	3
2. Activité antérieure (au CTGREF ex Cemagref).....	6
3-Activités de recherche à l'UR irrigation du Cemagref	7
4. Activité d'administration et autres.....	12
5. Activité d'enseignement et autres.....	13
6. Travaux et publications	14
7. Résumé d'une thématique de recherche :	
''Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts''	20
8. Perspectives de recherche.....	60
 ANNEXES.....	 66

Dossier administratif

1. Curriculum vitae

Jean Claude MAILHOL
 Prénom : Jean Claude
 Né le 19.02.1948 à St Georges D'orques (34)
 UR Irrigation
 Cemagref BP 5095 34033 Montpellier cedex 1
 Tél : 04 67 04 63 46
 Email : jean-claude.Mailhol@cemagref.fr

1.1 Fonctions actuelles

Chargé de recherche 1^{ère} classe depuis novembre 1993 et tout récemment nommé directeur de recherche à l'UR irrigation du Cemagref de Montpellier, je fais parti du TR (thème de recherche) GETIRI (Gestion intégrée des BV irrigués) qui associe des équipes travaillant sur les aspects socio-économiques de la gestion de l'eau à l'échelle du périmètre et du bassin versant et une équipe traitant des aspects liés aux impacts environnementaux de l'irrigation. C'est à cette dernière que j'appartiens et qui se compose d'un collègue chercheur dont l'activité est pour l'essentiel orientée vers l'expérimentation et la métrologie et de deux techniciens. Un projet de restructuration en cours prévoit la création dans les tous prochains jours d'un nouveau TR : ENVIRI et qui dissociera notre petite équipe du précédent TR. Elle bénéficiera de l'apport d'un chercheur (transfuge d'une autre UR) ayant des compétences en drainage et salinité et associera une autre équipe du Cemagref d'Aix en P^{ce} qui travaille sur la mise en œuvre au champ des matériels d'irrigation constituée de 4 ingénieurs-chercheurs et de deux techniciens. Le maintien d'une équipe à Aix résulte de la présence d'un laboratoire d'essai et d'expérimentation permettant entre autre la normalisation de matériels d'irrigation.

Mais activité propres concernent pour l'essentiel les aspects liés à la modélisation des transferts d'eau et plus récemment des solutés, selon différentes approches (conceptuelles, mécanistes) et à différentes échelles. Une part conséquente de mon activité de modélisation a été consacrée à l'irrigation gravitaire.

1.2 Fonctions antérieures

1972 -1973 : Au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique (LHM) Montpellier :

Participation à des études basées sur l'analyse des données :

- Variation spatiale de la pluie mensuelle pour l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse (AFBRM).
- Etude des coefficients d'écoulement des bassins côtiers de la région PACA (SRAE PACA)

1974 - 1977 :Coopération technique (VSNA 10/1973-1975, Coop. 1976-1977)

- Université d'ALGER : chargé de cours en hydrologie et statistiques appliquées
- Direction des Etudes du Milieu et de la Recherche Hydraulique (D.E.M.R.H) : participation à quelques études hydrologiques.

1977-1986 : Ingénieur contractuel d'Etude au CTGREF (ex Cemagref) d'ANTONY : Division Hydrologie-Hydraulique

1987-1993 Cemagref Montpellier : UR Irrigation : 01/01/1992 : Ingénieur d'étude contractuel établissement .Titularisé en IE 1^{ère} classe 2^E (passage de l'établissement en EPST) 11/1993 passage dans le corps des CR après concours : CR1 5^E .: CR1 8^E au 07/05/4. Statut actuel : DR en date du 08/05/04 après concours.

1.3 Formation et diplômes

2001 Thèse de Doctorat . Discipline : mécanique, génie mécanique, génie civil. Ed Sc. Eau Env. Cont. , UM II Montpellier
 1977- DEA Sciences des Eaux. Univ. Montpellier II
 1972-Diplômé de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM- MSTE)
 Spécialités : hydraulique, hydrologie, aménagement et gestion des eaux,

2-Activité durant près de dix années (1977-1987) au CTGREF-Cemagref

Avant d'aborder les thèmes de recherche qui me sont propres je souhaite présenter mes activités passées dans le domaine de l'hydrologie car bien que surtout centrées sur l'appui technique aux services du ministère de l'agriculture elles ont contribuées à me forger une manière d'aborder certains aspects de la modélisation appliquée à l'irrigation.

L'appui technique apporté aux différents services du ministère de l'agriculture constituait donc une des activités essentielles de la division hydrologie du CTGREF qui était un centre technique dépendant du ministère de l'agriculture et qui n'avait pas vocation à faire de la recherche. Je me suis donc vu confier des études ayant trait à la lutte contre les crues, ou à la gestion de réservoirs à buts multiples. Concernant la lutte contre les crues, il s'agissait de prédétermination. Mais les cas les plus intéressants consistaient à proposer des moyens de protection à l'aide de barrages écrêteurs judicieusement implantés et correctement dimensionnés pour ralentir les crues. Le cas du bassin de la Dives en Normandie constitue un exemple d'étude intéressant puisqu'il a été finalisé avec la construction de 3 petits barrages à pertuis ouvert.

Par la suite, les aspects méthodologiques sont devenus plus importants avec les problèmes de prévision de crues. Ces demandes d'appui technique ou d'études ont été souvent à l'origine de méthodes originales valorisées par des notes internes ou des publications(Mailhol, 1985).

Parallèlement à ces appuis techniques et à ces travaux méthodologiques, j'ai également participé à des travaux plus importants comme la synthèse nationale des crues des petits bassins versants (DIAME et al, 1981 ; Mailhol, 1981 ; Mailhol, 1982a,, Mailhol, 1982b) et l'étude relative au problème de l'extrapolation des courbes de tarage en hydrométrie (Mailhol, 1982b). Les problèmes énergétiques devenant d'actualité au début des années 80, la division fût sollicitée par la région Bourgogne pour réaliser un inventaire des potentialités hydroélectriques (micro centrales). Mon intervention, relative à ce problème, s'est focalisée sur la mise au point d'un outil d'homogénéisation des pluies et débits par analyse de la variabilité spatiale des phénomènes hydro-pluviométriques. (Michel et al., 1982).

L'acquisition du modèle distribué (CEQEAU) par la division avec pour objectif initial l'étude des influences humaines, me conduisit à aborder des aspect de la modélisation conceptuelle en hydrologie. Certains travaux sur les méthodes d'optimisation de fonctions non dérivables ont débouché sur l'élaboration de deux logiciels qui ont été intégrés aux modèles GR (Michel et Mailhol, 1985) : modèles hydrologiques développés à la division par Claude Michel. Sur ce thème "Modélisation conceptuelle" mon intervention a pour l'essentiel consisté en la comparaison des modèles hydrologiques de simulation et de prévision des débits (GR1 , CREC et CEQEAU, Mailhol, 1983)

dans le cadre d'une étude menée en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique (EDF Chatou, LNH-Cemagref, 1983).

En 1984-85 je fus chargé de l'étude des influences humaines sur l'hydrologie des petits bassins versants. Le reproche était fait au remembrement ainsi qu'au drainage d'aggraver les crues. Celles ayant affecté une partie de la Bretagne étaient à l'origine du regain d'intérêt pour ce genre d'études.. Beaucoup trop d'incertitudes ne m'ont pas permis d'apporter une réponse fiable à ce problème particulier des influences humaines sur le régime des cours d'eau. La technique du bassin unique comme celle du bassin témoin se sont avérées toutes deux inefficaces pour mettre à jour d'éventuels changements imputables à l'intensification du drainage ou du remembrement. (Lamure, 1984 ; Mailhol, 1990). Les raisons à cela sont multiples. Ces changements ne sont souvent que progressifs d'une part, et d'autre part il est bien délicat de faire état de ce qui résulte d'une évolution du système et de ce qui résulte du climat. En outre, les effets engendrés par le drainage ou le remembrement (contrairement à l'imperméabilisation d'hectares de BV résultant de l'urbanisation) peuvent être souvent de l'ordre de l'erreur de mesure. Quant à l'aide qu'est susceptible de fournir les modèles, force est de constater quelle est pauvre en raison de leur caractère empirique (paramètres dépourvus de sens physiques). A l'occasion des journées de la Société Hydrotechnique de France de septembre 86 organisées sur ce thème, j'étais chargé de rédiger la synthèse des débats ayant trait à ce thème.

Au cours des années 85 - 86 j'ai travaillé sur la prévision des crues suite à des demandes formulées par les comités techniques de bassin. Une première étude portait sur la "réactualisation" de la prévision des crues de l'Ill à Strasbourg avec prise en compte de l'influence de la fonte des neiges. Sur la base des travaux des chercheurs canadiens, une modélisation conceptuelle de ce phénomène a été proposée. La modeste taille du bassin n'a cependant pas permis de satisfaire les délais de prévision au delà de 8 heures.

La nécessité d'intégrer le prévisseur "pluie efficace" pour satisfaire aux délais de prévision requis, m'a conduit à mettre au point une méthode fondée sur la remise à jour, d'un paramètre représentant l'état initial du réservoir sol (modèles CREC, GR3). Uniquement testée au pas de temps journalier, cette approche encourageante n'a pas fait l'objet d'application à des cas concrets. Elle est illustrée par une note interne et a été intégrée dans le rapport conjoint Cemagref - LNH sur la comparaison des modèles (Cemagref-LNH, 1983). Cette idée de remise à jour de la fonction de production du modèle générateur de la pluie efficace a été reprise et adaptée à la méthode de l'hydrogramme unitaire (Mailhol, 1990).

La prévision des crues de la Seille à Metz m'a fourni l'occasion de mettre au point une approche originale de prévision de crues en l'absence de prévisseurs (stations hydrométrique amont) efficaces. Elle consiste à utiliser un petit bassin extérieur ayant la particularité d'être en avance sur les crues du bassin étudié (Mailhol, J.C., 1986). La nature impulsive des réponses rend nécessaire un filtrage du signal afin d'accroître l'efficacité des prévisions alors limitées à un délai de 6 h. Le délai a pu être étendu à 8 heures par traitement particulier du signal pluie : Avant introduction dans le modèle de transfert, dont les paramètres sont remis à jours par la procédure adaptative du filtre de Kalman, les pluies sont filtrées par un réservoir quadratique. On génère ainsi les sorties d'un bassin fictif en avance sur le bassin étudié. J'ai finalisé ces travaux par l'écriture d'un rapport et d'un logiciel utilisable en temps réel qui a été fourni au comité technique du bassin Rhin -Meuse. Ce logiciel a été par la suite utilisé avec succès sur d'autres bassins, comme l'Ill et la Brüche par les collègues du Cemagref de Lyon. Cette méthode n'a pas fait l'objet de publication si ce n'est dans deux notes internes. Une de ces notes souligne par ailleurs l'intérêt d'utiliser une parcelle drainée de référence pour témoigner des conditions initiales du bassin.

Ces travaux portant sur des méthodes opérationnelles de prévision des crues des petits bassins versants ont été publiés dans la revue Hydrologie Continentale. Complétés par ceux relatifs à la remise à jour des paramètres de modèles conceptuels en vue de prévision, ces travaux auraient pu faire l'objet d'une thèse. Mais mon départ pour l'unité irrigation de Montpellier m'amenaient à tourner la page de l'hydrologie des bassins versants .

Mes charges d'enseignement (ENGREF, ENGEES, Formation Continue) m'ont amené à rédiger des notes de cours et à contribuer à la rédaction du manuel d'hydrologie de Claude Michel .

3-Activités de recherche à l'UR irrigation du Cemagref

3.1 Thèmes de recherche

A l'UR irrigation mes activités de recherche ont été conduites au sein du TR GETIRI sur la problématique de la demande en eau régionale et celle des impacts environnementaux liés à l'irrigation à l'échelle de la parcelle. C'est autour de cette problématique des impacts environnementaux résultant des pratiques d'irrigation que l'accent sera plus particulièrement mis dans le cadre de ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Il convient cependant d'entendre par impacts environnementaux, à la fois gaspillage d'eau, d'où mon intérêt porté à l'estimation de la demande en eau à différentes échelles, et lessivage d'azote, source de pollution des nappes phréatiques.

La demande en eau régionale

Les conflits d'usage liés à la tension sur la ressource en eau dans la plupart des grands bassins versants sont de plus en plus fréquents en raison de l'accroissement des superficies irriguées depuis plus d'une décennie. La gestion efficace de l'eau nécessite une bonne connaissance des besoins. Celle-ci est variable dans le temps et dans l'espace. A la demande de l'Agence de l'eau Adour Garonne, une première approche a été développée en vue d'estimer cette demande en eau en différents points d'un grand bassin versant. Cette approche repose sur la spatialisation du bilan hydrique qui consiste à générer des informations pédo-climatiques au centre d'un ensemble de mailles constituant le domaine étudié. Le résultat de l'application est traduit sous la forme de cartes de besoins fréquentiels en eau ou de pertes de rendements selon différents niveaux de disponibilité en eau. L'outil développé (logiciel BILANREG), quant aux performances de ses interpolations, a été validé en certains points du bassin Adour-Garonne sur la base d'enquêtes menées chez des agriculteurs ainsi qu'à partir de données issues de stations expérimentales (Mailhol et Picheral, 1994, Picheral, 1993). Ces enquêtes ont permis d'appréhender la pratique des agriculteurs en matière d'irrigation selon la contrainte dont sont sujets les différents usages de l'eau (RE /8/)

Lors de certaines applications (cas du casier 1 de la CNABRL) l'outil développé est alimenté par les données satellite permettant d'estimer l'assolement (RE./3/). Cette dernière approche n'est pas toujours satisfaisante car il est difficile de distinguer certaines cultures entre-elles. Cela n'est à l'évidence pas sans conséquence sur la fiabilité d'estimation de la demande en eau (un abricotier consomme par exemple 3 à 4 fois moins qu'un pêcher et ce rapport est à peu près du même ordre entre un tournesol et un maïs). Afin de pallier certaines insuffisances de la méthode basée sur l'interprétation de l'imagerie satellite et compte tenu du fait que, dans bien des cas, l'agriculteur ne peut apporter l'eau à la plante quand celle-ci en a besoin compte tenu des contraintes qui pèsent sur son exploitation, une approche complémentaire a été mise en œuvre (Labbé et al.,1997 ; Mailhol et Ruelle, 1999). Elle consiste à analyser les pratiques des agriculteurs puis à les simuler (Modèle GESCAN : simulation d'un canon avec enrouleur : Mailhol et Ruelle, 1999) en vérifiant que la consommation calculée est proche de la consommation mesurée au niveau de l'exploitation. Ainsi le modèle permettant l'estimation de la demande en eau intègre à la fois les besoins de la plante mais aussi la pratique des agriculteurs.

La correction des éventuelles dérives du modèle permettant l'estimation de la demande en eau à l'échelle d'une région peut être envisageable moyennant la confrontation de la carte des évapotranspirations réelles (ETR) simulées (RE /8/) à celles des ETR estimées à partir de l'interprétation des données satellites à une date donnée. Cette confrontation a été tentée, mais s'est révélée infructueuse en raison de l'hypothèse forte adoptée: le maïs comme monoculture occupant tout l'espace. Une autre raison pouvant expliquer cet échec résulte de l'imprécision de la méthode reposant sur l'imagerie satellite pour estimer l'ETR. Cependant, malgré le contexte d'une culture dominante comme sur le cas de la Charente les résultats de l'étude menée sur le casier 1 de la BRL ne nous incitent guère à l'optimisme en ce qui concerne le succès escompté. Une typologie des exploitations à l'échelle du bassin versant peut contribuer à améliorer la connaissance de la demande en eau à cette échelle. Un travail dans ce sens est poursuivi sur la Charente dans le cadre d'une convention entre le Cemagref et le MEDD.

Dans le cadre du projet GICC Rhône une actualisation de la demande en eau intégrant les aspects liés aux changements climatique a été initiée. En préambule, une étude bibliographique sur le sujet: "impact du changement climatique sur l'irrigation (et vis et versa)" a été réalisé en 2001. Un travail réalisé avec un ingénieur-chercheur mexicain (RE : /9/) a permis de traiter de l'impact des changements climatiques sur la demande eau dans le contexte du périmètre irrigué de la Drôme. Un article (Gonzalez et al., 2003) a été soumis à Agronomie.

L'estimation de la demande en eau au niveau de l'exploitation requiert une modélisation suffisamment élaborée du système eau – sol – plante. Il faut, en effet, non seulement pouvoir simuler l'impact des pratiques sur la consommation en eau mais aussi sur les rendements. La l'étroite relation liant ces deux aspects, peut mis à profit pour valider les modèles de cultures dans certains contextes où seule la donnée relative au rendement est disponible. Il convient cependant de demeurer modeste quant au niveau de sophistication recherché compte tenu de la difficulté d'obtention de certains paramètres dans un contexte qui s'éloigne quelque peu du contexte expérimental. Un effort a donc été fourni pour développer un modèle à caractère opérationnel, avec peu de paramètres (Mailhol et al., 1996a, Mailhol et al., 1996b, Mailhol et al., 1996c) susceptible de donner des résultats suffisamment fiables concernant la simulation du bilan hydrique et du rendement de la culture. Ce modèle repose sur la simulation du LAI (indice foliaire). Le module rendement, initialement développé sur le cas du sorgho et du tournesol (Mailhol et al., 1997c), a depuis été étendu à d'autres cultures comme le maïs (Mailhol, 2001, Mailhol et Ruelle, 1999) et le blé (Mailhol et al., 2004a). Pour valider ce modèle au même titre que des modèles de cultures intégrant le volet azote tels que STICS (INRA), on dispose d'un site expérimental sur le domaine de Lavalette au Cemagref de Montpellier.

Demande en eau de type "temps réel"

Dans le cadre d'une collaboration avec le thème de recherche TRANSCAN (transfert d'eau dans les canaux) j'ai été amené récemment à développer, pour le compte de la CACG, (compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne) un modèle de simulation des transferts d'eau dans un bief sujets aux prélèvements pour l'irrigation (RE /7/). La prédominance des échanges nappe-rivière et le souci de prendre en compte les apports intempestifs du bassin intermédiaire liés à d'éventuels orages estivaux m'ont amené à coupler l'approche hydrologique pluie-débit à l'approche hydraulique du transfert. Cette dernière repose sur la méthode du "Lag and Rout" proposée par Bentura et Michel, (1997). Le modèle donne des résultats satisfaisants sur le cas de la saison 98 mais demandent à être confirmés sur d'autres scénarios climatiques. Une méthodologie de calage validation a été proposée. Des recherches plus approfondies mériteraient d'être poursuivies en vue d'améliorer la prise en compte des différents types de prélèvements (en nappe et/ou rivière) ainsi que la contribution hydrologiques relevant des échanges nappe-rivière (contribution de la nappe suite à l'arrêt des pompes). Un projet de thèse sur ce sujet en collaboration avec le TR TRANSCAN a été formulé.

Pratiques d'irrigation (principalement gravitaire) et étude des impacts environnementaux liés à l'irrigation

Les techniques de planage au laser et l'usage des systèmes de distribution d'eau en tête de parcelles ont permis d'améliorer fort significativement les performances hydrauliques de l'irrigation gravitaire. Une conduite des arrosages bien adaptée aux conditions de la parcelle permet d'accroître encore l'efficacité. La définition des paramètres attachés à cette conduite s'appuie sur la modélisation du processus avancement infiltration. Mon activité dans ce domaine a pour l'essentiel consisté à développer une modélisation visant à définir les paramètres optimaux d'un arrosage d'une parcelle dans des conditions initiales données. Dans un premier temps la modélisation du processus s'est limitée à l'échelle de la raie (ou de la planche) et de l'événement : une irrigation. Un modèle analytique couplant avancement et infiltration a été développé pour prédire et optimiser en temps réel les performances d'un arrosage (Mailhol, 1992b, Mailhol, 1996a). Une approche conceptuelle de la loi d'infiltration de ce modèle a été initié sur de sols à effet macro-pore dominants (Mailhol et Gonzalez, 1993). Le modèle a par la suite été adapté pour pouvoir simuler différentes conduites d'irrigations

(Mailhol, 1992a, Mailhol, et al, 1997b) et tenir compte de conditions de sol hétérogènes (Mailhol et al., 1999). La variabilité spatiales du phénomène d'avancement étant une des caractéristiques majeure de l'irrigation à la raie, je me suis intéressé à la prise en compte de la variabilité spatiale du processus avancement-infiltration (encadrement d'une thèse soutenue en 1991).

L'objectif actuel est de simuler l'impact des pratiques d'arrosage et de fertilisation sur la production et le lessivage des nitrates à l'échelle de la parcelle en irrigation à la raie (22/29/30/31). Sur cet aspect particulier 2 thèses ont publiées. La première, en co-encadrement avec F. Brisseau de l'UMII, traitait des transferts d'eau et de d'azote en irrigation à la raie. Cette thèse était fortement centrée sur l'usage du modèle de culture STICS (INRA) dans les conditions de l'irrigation à la raie. Ce travail a montré qu'un modèle de type capacitif tel que STICS n'est pas bien adapté à la simulation du transfert de soluté dans le contexte 2D de l'infiltration eu égard à la technique de fertilisation adoptée par les agriculteurs du S-E de la France. La deuxième et la mienne qui fédère de façon originale un certain nombre d'articles publiés avec pour objectif de mettre en œuvre une approche intégrée permettant de simuler l'impact d'une pratique d'irrigation à la raie sur l'efficience et le rendement à l'échelle de la parcelle. Dans ce travail, expérimentation et modélisation des transferts 2D eau-solutés mettent en évidence le fait qu'un éventuel drainage durant le cycle cultural n'est pas forcément synonyme de lessivage d'azote en liaison avec la technique de fertilisation couramment utilisée en irrigation à la raie dans le sud-est de la France. Ce travail a permis de souligner l'intérêt de l'usage conjoint d'approches pouvant se montrer complémentaires comme la modélisation intégrée développée dans le cadre de cette thèse et modélisation spécifique mécaniste pour traiter de la façon la moins erronée qui soit d'un problème complexe.

La participation au projet européen NIWASAVE avec les collègues de la division d'Aix en Pce m'a amené à travailler sur les aspects environnementaux liés à l'irrigation par aspersion notamment dans le cadre d'une application sur le contexte des sols superficiels de Charente (Ruelle et al., 2003). L'analyse des pratiques de l'irrigation au canon enrouleur a permis de dégager des règles d'utilisation de l'appareil dans le contexte des sols superficiels en Charente. L'application de ces règles a fait l'objet d'un calage sur la base des volumes apportés (relevés compteurs volumétriques) et des rendements obtenus. Un certain nombre de scénarios ont été testés sur une série climatique de 11 années. Celui ayant trait au sens de fonctionnement du canon par rapport à la direction du vent dominant (Atlantique), ou le fait d'irriguer la nuit ou le jour sont tous deux sans effets majeurs sur le rendement et les risques de lessivage d'azote. Comme attendu, l'incidence de l'espacement des passages de l'enrouleur est quant à lui notable. Des effets bien plus significatifs sur le drainage et le lessivage sont obtenus en réduisant le niveau des doses d'eau et de fertilisants. Une réduction de 20% des doses de fertilisant réellement appliquées a un effet très bénéfique sur l'environnement sans réduire de façon très conséquente le rendement du maïs.

Le souci de promouvoir une agriculture respectueuse de l'environnement, est à l'origine des expérimentations menées depuis 2001 sur le site de Lavalette au Cemagref. Elles concernent la technique du semi direct. Cette technique très répandue dans certains pays comme au Brésil pour conserver les sols (lutte contre l'érosion et amélioration de leur fertilité), consiste à éviter le travail du sol en favorisant la mise en place d'un paillis émanant de résidus de cultures. Ce résidus de culture est pour l'essentiel apporté par une pré-culture détruite au glyphosate peu de temps avant le semis (semoir adapté) de la culture principale. Outre les économies d'énergie quelle suscite, cette technique favorise le maintien d'une micro-faune et à contribue à la réduction des entrants. Transfert d'eau et devenir de l'azote sous culture conduite en aspersion font l'objet d'un suivi. Un article sur ce thème (Mailhol et al., 2004f) est soumis à "Irrigation and Drainage". Une collaboration avec une équipe du CIRAD intervenant au Mexique a été tout récemment initiée pour appliquer cette technique du semis direct au cas de l'irrigation gravitaire. Le fait de ne pas de-structurer le sol, puisque les travaux de labours sont réduits voire supprimés, ne peut qu'induire des économies d'eau conséquentes lors de la première irrigation.

3.2 Encadrements de DEA, DAA, DESS, Ingénieurs, et Doctorants

- Lamure D. , 1984: Analyse du comportement hydrologique de 2 bassins versants au couvert forestier contrasté au moyen d'une modélisation Pluie-Débit. (Orsay)
- Maïga A., 1985. Affinement du bilan hydrologique d'un petit bassin versant en vue d'y estimer les pertes par infiltration profondes. (Engees).
- Girousse J.C. 1987. Estimation des volumes stockés en surface au cours d'une irrigation à la raie. (UM2).
- Houhou C 1990. Evaluation d'une méthode d'aide à la gestion d'une irrigation à la raie. (ENGEES).
- Benour A. 1996. Identification des paramètres d'arrosage en irrigation à la raie. Le cas de la canne à sucre sur vertisols (ENGREF).
- Pressurot A. 1997 : Stratégies d'irrigation de la betterave à sucre sur vertisols au Maroc. (UMII)
- Triki K:2002,. Etude des transferts 2D Eau-Solutés. Expérimentation et modélisation. ENMECA Marseille
- Taky, A. 2003, Impact des pratiques d'irrigation gravitaire sur le ruissellement hivernal dans la plaine du Gharb au Maroc, (UM2).

DAA:

- Rakotoarisoa A 1988. Prédétermination de la qualité hydraulique des arrosages. Application au cas des raies courtes. CNEARC
- Nevez, V., (1989. "Test du modèle analytique RAIEOPT sur une parcelle de limons. (ENSA Leida, Espagne)
- Priol M (1996), , Etudes des facteurs influençant l'infiltration en irrigation à la raie sur les vertisols de la plaine du Gharb au Maroc. (ENSAM)

DESS :

- Picheral I 1993,. Validation du modèle BILANREG dans le bassin Adour Garonne. (Paris VI)
- Juliot Y 1998. L'impact de la pratique d'irrigation sur la performance des arrosages à la raie sur canne à sucre : le cas des vertisols du Gharb (Maroc).

Mémoires d'Ingénieurs ou équivalents:

- Roveri J. 1987. Etude des conditions d'utilisation des matériels d'irrigation gravitaire à l'irrigation des prairies en Lozère. (ISIM)
- Vodicka A. (2000), " Analyse des pratiques d'irrigation gravitaire dans le moyen Sébou (Maroc) " Enesad Dijon
- Muller A. 2001. Identification des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol par méthode inverse. Univ Dresde

Le Blanc J: 2001. Changements climatiques et irrigation Revue bibliographique. INA Paris.

Encadrement de doctorants

Thèses soutenues :

Gonzalez GM 1991. Une modélisation stochastique de l'irrigation à la raie. Thèse UMII, Avec C. Bocquillon

Nemth I., 2001. Devenir de l'azote sous irrigation à la raie. Application au cas d'un périmètre irrigué du Mexique. Thèse UMII. Avec F. Brissaud

Thèses en cours :

Crevoisier D. Modélisation analytique des transferts 2D Eau-Solutés avec couplage à un modèle de culture. Thèse ENGREF Co-directeur : Prof. G.Schmitz Univ Dresde.

Slatni A. Analyse des facteurs conditionnant la reconversion des systèmes d'irrigation gravitaire en Tunisie. Thèse en co-tutelle Engref-Inat (Tunis). Avec le Professeur Zayani

Taky A. Le gravitaire modernisé pour évacuer l'excès d'eau hivernal et améliorer la production des cultures dans la plaine du Gharb (Maroc). Thèse en co-tutelle Engref-IAV. Avec le Professeur Debahr.

3.3 Activité de re-lecteur pour des journaux à comité de lecture

Je suis sollicité comme re-lecteur d'articles pour certains journaux ou revues à CL: journal de l'ICID (3 en 1999-2001)- Cahier d'agriculture(2 en 2000-2001). J. of Irrig and Drain Eng. ASCE (1 en 2001, 3 en 2002, 2 en 2003), Revue Agronomie. (1 en 2002).

J'ai également participé à la correction et à la critique d'articles pour les séminaires organisés dans le cadre de projets de collaboration financés par la CFD aux Maroc (IAV Rabat 1999) et en Tunisie (INRGREF 2000). J'ai été enfin rapporteur de la thèse de Nery Zapata soutenue en Octobre 1999 à l'université de Leida (Esp.). dont le titre était : " Improvement of surface irrigation systems".

3.4 Publications de recherche

Revue internationale à comité de lecture 16 publiées + 4 soumissionnées

Ouvrage en commun (3): SNC (petits BV), Manuel d'hydrologie (petits Bv), Guide pratique d'irrigation

Colloques -congrès –séminaires : plus d'une trentaine

4. Activité d'administration et autres

4.1 Collaboration scientifique

Une collaboration scientifique a été entreprise avec le laboratoire d'hydrologie de l'université de Dresde. Un stagiaire de cette université sous ma responsabilité pour traiter des méthodes inverses d'identification des paramètres de transfert d'eau et de solutés en milieu poreux non saturé (Mueller, 2001). Le professeur Schmitz co-encadre avec moi une thèse sur les transferts 2D eaux solutés.

Une collaboration scientifique existe également avec des collègues de l'INRA sur l'ASS AQUAE, avec ceux du CIRAD et de l'IRD dans le cadre du PCSI (programme commun des systèmes irrigués) et sur

l'A.C.I. "écologie quantitative" appliquée au contexte du périmètre du Tadla (Maroc) où une approche intégrée pour décrire l'évolution des flux d'eau à différentes échelles doit être mis en œuvre.

Dans le cadre d'un projet ECO-COOP une collaboration dans le domaine de l'irrigation à la raie et de la micro-irrigation vient de se construire avec l'institut des sciences du sol et d'agroécologie de Sofia (Bulgarie) et l'ISS de Bratislava (Slovaquie).

4.2 Activités à l'étranger

En dehors de missions de formation (Ingénieurs de l'IA à Maurice en 1994) ou d'expertise (avenir de la filière coton en Andalousie suite aux sécheresses successives, en 1995) mon activité à l'étranger s'oriente plus particulièrement vers les pays du Maghreb tels que le Maroc (depuis 1994) et la Tunisie (depuis 1996). Pour le premier il s'agit d'une assistance technique à un organisme de développement (ORMVAG) financée par l'Agence Française de Développement pour le second, il s'agit d'une coopération scientifique avec un organisme de recherche (INRGREF).

Ces activités au Maghreb s'inscrivent dans le cadre des projets WADEMD ciblé sur la programmation de séminaires réunissant des spécialistes qui oeuvrent pour une meilleure utilisation et un meilleur partage de l'eau. Elles s'inscrivent également dans le cadre d'un projet FSP – SIRMA (syst. Irrigués au Maghreb) visant quant à lui à définir des problématiques de recherches finalisées par des thèses organisées en co-tutelle.

4.3 Gestion de projets

J'ai participé à la mise en forme de projets européens avec des collègues espagnols tel que le projet AVICENNE (1994) qui n'a pas aboutit contrairement au projet NIWASAVE pour lequel les collègues du Cemagref d'Aix étaient pilotes et regroupait 5 partenaires dont 1 Anglais, 1 Espagnol, 1 Italien 2 Français (INR, Cemagref) et qui s'est étalé sur 3 ans. Ce projet traitait de l'impact des hétérogénéités (pour l'essentiel dues au vent) en système d'irrigation par aspersion sur les risques environnementaux et le rendement à l'échelle de la parcelle.

J'ai également participé au projet AQUAE initié par le Cemagref et L'INRA sur la thématique de l'irrigation de précision. Enfin, je suis co- responsable du projet ECO-COOP évoqué précédemment.

5. Activités d'enseignement et autres:

5.1 Enseignement :

J'assure depuis 1998 des cours (Transferts d'eau et Stats applic : au total 22 h) au DEA des sciences de l'eau dans l'environnement continental commun à l'ENGREF et à l'UMII. J'assurais jusqu'à ces derniers temps des cours sur l'irrigation gravitaire au CNEARC et à l'Université d'Avignon.

Ces cours ont fait l'objet de rédactions de notes et de photocopies..

5.2 Jury de thèse : .

J.M. Gonzalez, 1991 soutenue à l'UM2

N. Zapata, 1999 soutenue à l'université de Leida (Espagne)

I. Nemeth, 2001 soutenue à l'UM2

5.3 Comité de pilotage de thèse :

Thèse de A. Zanolin sur l'intérêt de l'irrigation de précision.

5.4 Activité informatique : écriture et gestion de logiciels

Depuis mon entrée au Cemagref en 1977, j'ai été amené à écrire de nombreux logiciels tant dans le domaine de l'hydrologie que de l'irrigation. La plupart répondaient à des demandes internes en

liaison avec le travail en cours. D'autres répondaient à des demandes externes et devaient être fournis au commanditaire de l'étude :

- PREV : pour la prévision des crues de la Seille à Metz (client : comité de bassin Rhin Meuse)
- BILANREG : pour l'estimation de la demande en eau et du rendement à l'échelle régionale selon disponibilité en eau (client DIREN Adour-Garonne).
- TRANSF : pour le transfert d'un débit le long d'un bief de rivière soumis aux prélèvements pour l'irrigation avec éventuelle contribution du bassin versant. (client CACG).

D'autres logiciels comme PILOTE (pilotage des irrigations, estimation du BH et calcul du rendement), identification d'une stratégie d'irrigation sur séries climatiques), RAIEOPT (conduite type temps réel des arrosages à la raie, ou prédiction des performances d'un arrosage) sont utilisés par des organismes de recherche développement (CIRAD), IA (Ile Maurice) ou écoles (Rodian, 30), IAV (Rabat), INA (Alger), et Offices de mise en valeurs agricoles (ORMVA, Maroc). Quant au logiciel SOFIP, qui permet d'analyser l'impact d'une pratique d'irrigation sur les risques de percolation profonde et la production, il devrait être d'ici peu utilisé sous une forme ludique à l'exposition permanente sur l'eau (à La Villette et itinérante). Cette exposition permanente a pour objectif de sensibiliser un jeune public à la problématique des économies d'eau et à sa valorisation.

6. Travaux et publications

6.1 Congrès et séminaires :

- Mailhol J.C., 1981. Pour une approche réaliste des temps caractéristiques des crues des petits bassins versants ruraux. Congrès de l'A.I.S.H., Oxford, Avril 1980.
- Michel, C. et JC. Mailhol 1981. La méthode SOCOSE - XI ème Congrès de la CIID, Grenoble 1981.
- Michel, C., Mailhol, J.C., D. Orcet D., et M. Marion. 1982. Synthesis of Burgundy's small river yield for the purpose of hydro-power - W.M.O. BERNE, Sept 1982.
- Mailhol, J.C., 1985. Un exemple d'études préliminaires des ressources en eau d'un petit bassin rural et agricole en vue de son aménagement hydraulique : le HAUT CHAPEAUROUX (LOZERE) - INRA, Vth World congress on Water Resources 8-18 Juin 1985 BRUXELLES.
- Michel, C., et JC. Mailhol 1985. Le Modèle GR2. Journées hydrologiques de l'ORSTOM 17-18 Sept. 1985 Montpellier, 266-271 p.
- Mailhol, J.C., 1986. Improvement and Statistical Control of Water balance on a Small Basin to Assess Losses by Deep Infiltration. Water Management of Agricultural, 4-7 Avril 1986 ATHENES.
- Mailhol J.C., Girousse, J.C., et A. Rakotoarisoa 1988. Essai de prédétermination de la qualité hydraulique d'un arrosage : applications aux raies courtes. CIGR, Symposium Ilorin NIGERIA, Sept. 1988 : 403-410 p.
- Mailhol, J.C., P. Berthomé, D. Renault, 1989. Choix des paramètres d'arrosage en irrigation à la raie. Colloque sur les méthodes d'irrigation améliorées, Avignon 25-29-Sept. 1989.
- Mailhol J.C. et T. Rieu, 1991. Evaluation économique de l'irrigation de complément à partir des besoins en eau et fonctions de rendement des cultures, 1^{er} Colloque sur les applications de la météorologie et leurs intérêts économiques. Salines d'ARC et SENANS (DOUBS), 24-26 Avril 1991 : 203-221 p.

- Mailhol J.C., 1992a. Méthodes de conduite de l'irrigation à la raie pour améliorer son efficacité - 16th European regional conference of ICID . BUDAPEST juin 1992 p174-183 .
- Mailhol, J.C., I. Picheral , 1994. Regional water requirements and crop yield according to water availability , 17th European regional conference on irrigation and drainage. ICID Varna May 1994. 73-82p.
- Mailhol J.C., P. Ruelle, P. Revol 1996a. PILOTE : Un modèle opérationnel pour déceler l'apparition du stress hydrique. ICID Le Caire Sept. 1996.
- Mailhol, J.C., O. Olufayo, P.Ruelle, C. Baldy, A. Adaoui 1996b. Maximisation of limited amount of water : Forecasting and irrigation scheduling. Application to a case of grain sorghum. ICID le Caire Sept. 1996.
- Mailhol J.C.,1996c. Operative furrow irrigation modelling for real time applications: Calibration analysis for prediction purpose. Colloque sur la recherche en irrigation . Hamman Juil. 1996.
- Mailhol J.C., Baqri, M., Benali, M., 1997a. Furrow irrigation practices adapted to heterogeneous infiltration conditions. Workshop on the use of water in sustainable agriculture 2-4 june 1997 Albacete (Spain).
- Labbé F., P. Ruelle, P. Leroy, J.C. Mailhol, 1997. Pratiques d'irrigation au niveau de l'exploitation agricole et analyse de la gestion de l'eau en situation de manque: étude de cas en Charente. CIID Oxford Sept. 1997.
- Mailhol, J.C., Benali, M., 1999. Amélioration de la pratique de l'irrigation à la raie dans la plaine du Gharb. I Analyse des sources de variabilité pénalisant l'efficacité des arrosages, Séminaire Euro-méditerranéen : la maîtrise de l'irrigation et du drainage pour une gestion durable des périmètres irrigués méditerranéens. 12 p.
- Mailhol, J.C., Benali, M., 1999. Amélioration de la pratique de l'irrigation à la raie dans la plaine du Gharb. 2 Une modélisation pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation sur l'efficacité à l'échelle de la parcelle. Séminaire Euro-méditerranéen : la maîtrise de l'irrigation et du drainage pour une gestion durable des périmètres irrigués méditerranéens. 11 p.
- Mailhol, J.C. et 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., Zairi A., Nasr, Z., Sltani A. Ruelle P., Bennoura B., 2000. Utilisation de la modélisation pour identifier des stratégies d'irrigation en intégrant la variabilité pédoclimatique. Séminaire: Economie de l'eau en irrigation Hammamet 14-16 Nov.,2000 Tunisie.126-135p.
- Mailhol J.C., Slatni A., Zairi, A., Ruelle, P., 2000. Choix des paramètres de conception à la parcelle en irrigation de surface: Modélisation. Séminaire: Economie de l'eau en irrigation Hammamet 14-16 Nov.,2000 Tunisie.41-50p.
- Mailhol J.C., Ruelle P. Muller, G.H. Schmitz, 2002. Evaluation of risks of nitrate leaching under furrow irrigation according to a fertilisation technique. ICWER , Dresden (Germany), Vol (II) 91-95 p.

- Mailhol, J.C. , Ruelle, P., Nemeth, I., Benali, M., Delage, L. 2003 Using an operative integrated model to identify furrow irrigation practices accounting for spatial variability at field level during a cropping season. Application in France, Morocco and Mexico. ICID conference 17-19 Sept. 2003, Montpellier
- Slatni A., Mailhol J.C., Zairi, A., Ruelle, P., 2000. Choix des paramètres de conception à la parcelle en irrigation de surface: Expérimentation. Séminaire: Economie de l'eau en irrigation Hammamet 14-16 Nov.,2000 Tunisie.27-40 p.
- Slatni, A, Mailhol, JC, Château, G, Zairi, A, 2004. Diagnostic des pratiques d'irrigation localisée dans la vallée de la Medjerda (Tunisie), Séminaire Euro-Méditerranéen " la modernisation de l'agriculture irriguée", 19-21 Avril 2004 Rabat (Maroc).
- Zairi, A., Mailhol J.C , Slatni A. 1998. Water restriction impact on surface irrigation efficiency in cracking soils. 1st Inter Regional Conference on environment -water inovative issues in irrigation and drainage. Lisbon, 16-18 Sept. 1998.
- Zairi, A., Sltani, A., Mailhol, J.C., Ruelle, P., El Hamami H. 2003. L'irrigation de surface dans le contexte tunisien. Perspectives d'améliorations sous différentes conditions de disponibilités en eau. ICID, Montpellier 11-17 Sept . 2003.
- Mailhol, J.C, Vodicka, A, Slatni, A, Ikam, M. 2004. Diagnostic des systèmes d'irrigation traditionnels dans le moyen Sebou (Maroc): perspectives d'amélioration. Séminaire Euro-Méditerranéen " la modernisation de l'agriculture irriguée", 19-21 Avril 2004 Rabat (Maroc).

Reuves françaises ou congrès à comité de lecture

- Mailhol, J.C. 1982a.. Prédétermination des caractéristiques averse - crues sur les petits bassins versants ruraux Cahiers Inf. Tech. CTGREF. 1982
- Mailhol, J.C., 1989. Une méthode pour améliorer la qualité de l'irrigation à la raie. Cahiers Info. Tech. Cemagref N° 74 note 7 .
- Mailhol J.C., P. Ruelle, P. Revol, L. Delage, JM. Lescot, 1996d. Operative modeling for evapotranspiration assessment : Calibration methodology. ASAE proceeding San Antonio (Texas) Nov. 1996.
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., Nemeth, I., 2000. Analysis of nitrate leaching under sprinkler and furrow irrigation techniques on a loamy soil plot with corn. ICID 22-27 Oct. 2000 Cape Town South Africa. Proceeding of an intern. Workshop . On control of adverse impacts of fertilizers and agrochemicals Ed: by A. Mermoud A Musy L.S. Pereira and R. Ragab.113-126.
- Morardet S., JC Mailhol , A. Vidal, P. Garin et G. Gleyzes, 1998. Sécheresse et demande en eau d'irrigation : éléments de réflexion. Ingénieries-EAT- N°13 15-28 p.
- Ruelle, P., Mailhol, J.C., Itier, B., 2004. Horaires d'irrigation et pertes par évaporation . Revue Ingénieries-EAT, Juin 2004. No 38, 13-20p

Publications à comité de lecture :

- Mailhol J.C., 1986. Recherche d'un prévisseur efficace pour la prévision des crues de la Seille à METZ en l'absence de stations amont efficaces. *Hydrologie Continentale* Vol. I N° 2, 1986 : 141-151 p.
- Mailhol J.C., 1990. Adaptabilité et Validation Opérationnelle - Un cas simple sur modèle élémentaire. *Hydrologie Continentale*, Vol . 5 N°2, 1990 : 125-134 p.
- Mailhol J.C.1992b. Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. *ICID Bulletin*, vol. 41, N° 1, 43-60 p .
- Mailhol J.C., JM. Gonzalez, 1993. A furrow irrigation model for real time applications on cracking soils - *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol 119 N°5 Sept/Oct 1993, 768-783p.
- Mailhol J.C.,1994. Méthode pour apprécier les chances de rentabiliser son matériel d'irrigation . *ICID revue*. Vol 43 (1) 37-52p
- Mailhol J.C., P. Ruelle, P. Revol, 1997b. Un outil de gestion d'un volume d'eau limité pour optimiser le rendement d'une parcelle irriguée. *ICID revue* Vol 46 n°2 15-30p.
- Mailhol J.C., M. Baqri, M. Lachhab 1997c. Operative modelling for closed -end furrows. *Irrig. and Drain. Syst. Revue*, 11: 347-366p.
- Mailhol J.C., O. Olufayo, P. Ruelle 1997d. AET and yields assessments based on the LAI simulation. Application to sorghum and sunflower crops. *Agricultural Water Management revue*,35(1997) 167-182p.
- 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*. 1475 (1999) 1-17
- Mailhol, J.C., Ruelle, P., Nemeth, I., 2001. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science*,. Vol 20, no, 3, Juil. 2001, p. 139-147.
- 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 Spec Sciences de l'eau dans l'environnement continental. UMII. 260p (+ annexes).
- Xu P. , F. Brissaud, J.C. Mailhol, F. Valette, V. Lazarova. 2002. Design of climate-dependent water reuse project. *Water Sci. and Technology* Vol 46 No 6-7 pp 289-296.
- Mailhol J.C., 2003. A predictive form of Horton's equation for simulating furrow irrigation. *J. of Irrig. and Drain ASCE*, Vol 129 (6): 412-421.
- Ruelle, P. Mailhol, J.C., Quinones, H., Granier J. 2003. Using NIWASAVE to simulate impacts of irrigation heterogeneity on yield and nitrate leaching when using a travelling rain gun system in a shallow soil context in Charente (France), *Agric. Water Manag.* Vol 63, 15-35p.
- Gonzalez J.M., Mailhol, J.C., Ruget F., 2004. Impacts locaux attendus du changement climatique sur

la demande en eau et le rendement du maïs dans le bassin de la Drôme, France. Soumis : dans Agronomie.

Mailhol J.C., Zaïri A., Slatni A., Ben Nouma, B., El Amani, H., 2004a. Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia' . Agric. Water Manag. (70), 19-37

Mailhol J.C., Ruelle P. 2004b, and Z. Popova ‘‘SOFIP: A field-scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. Soumis à Irrigation Science..

Mailhol, J.C., Triki, K., Crevoisier, D., 2004c. Impact of water depth on nitrate leaching under furrow irrigation according to a fertilisation technique. Soumis a Agric. Water Manag.

J. C. Mailhol, P. Ruelle, L. L. Delage, S., Diallo, 2004f. Adapting an operative crop model for water balance estimation on a no-tillage cropping system (NTCS). Soumis à Europ. Journ. Of Agron.

Wholling T., Mailhol J.C., Schmitz, G., 2004. Modelling 2D-infiltration from irrigation furrows : Analysis of an analytical and numerical approach. J. of Irrig. and Drain. Engin. ASCE. Vol 130 No. 4, 298-303.

Ouvrages et travaux divers

DIAME-SH, SRAE, CTGREF, Synthèse nationale des crues des petits bassins versants ruraux, fascicules 1-2-3. Paris, 1982.

Mailhol, J.C., 1982b. Synthèse nationale des Crues Fascicule 4 : Caractéristiques averse-crues. DIAME-SH , SRAE, CTGREF, Paris 1982.

Mailhol, J.C., 1982c. Extrapolation des courbes de tarage en hydrométrie. Note technique No 10 , fascicules 1 et 2, CTGREF (1981-1982).

Mailhol, J.C. , 1983 Note technique : Comparaisons de 3 modèles conceptuels (GR1 , CREC, CEQEAU) ,

Notes internes à caractère méthodologique: crues petits bassins, étiages, (prédétermination , prévision)

Rapports d'études (RE) et notes internes:

- Rapports d'études (inventaire détaillé non effectué) : prédétermination et prévision des crues, gestion de retenus, études d'impacts. Notes internes.
- LNH, CEMAGREF comparaison des modèles hydrologiques (1983).
- Participation à la rédaction du manuel d'hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux

1 -Evaluation économique de l'irrigation de complément en BOURGOGNE, avec T. Rieu (Avril 1990).

- 2 - Evaluation à l'échelle régionale des besoins en eau et du rendement des cultures selon disponibilité en eau. Application au Bassin ADOUR-GARONNE (juin 1992) .
- 3- Evaluation des consommations théoriques en eau d'irrigation. Télédétection et SIG pour la cartographie des besoins en eau des principales cultures sur le casier 1 de la BRL .
- 4- Contribution à la connaissance des pratiques d'irrigation dans le Bassin RMC. Eléments pour la mise à jour des barèmes forfaitaires de volumes d'eau pour l'irrigation. Etude pour le compte de l'Agence de l'Eau RMC (Novembre 1994)
- 5- Rapport d'expertise : Avenir de la filiale coton de la CFDT en Andalousie (1995)
- 6-Mailhol, J.C., Platon J.P., 1997. Mise à jour des références technico-économiques sur les matériels d'irrigation de surface. Rapport d'étude pour l'Agence de l'Eau RMC.
- 7-Mailhol, J.C., Un modèle de prévision des débits à l'aval d'un bief sujet aux prélèvements pour l'irrigation: rapport d'étude CACG., 30 p. (Décembre 2000)
- 8- P. Garin, S. Morardet, J.C. Mailhol. 2000. Analyse de différents modes d'allocation des volumes de référence sur le fleuve Charente, à l'amont d'Angoulême. Rapport d'étude pour le compte du Conseil Général de la Charente, 40p
- 9- Gonzalez, JM, Mailhol J.C., (2002) Impacts attendus du changement climatique sur l'agriculture irriguée dans la basse vallée de la Drôme ,. 65 p + annexes.
- 10- Mailhol, J.C., (2003). Estimation des flux d'eau sous cultures irriguées, (2003). Etude pour le compte du MEDD, 30p + annexes.

7. Résumé d'une thématique de recherche :

Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts

Introduction

Le recours à irrigation est dans bien des cas nécessaire pour garantir le maintien d'un niveau de production suffisant dans de nombreuses régions du monde. En France ces régions concernent le Sud-Est et une grande partie du Sud-Ouest. Mais depuis plus d'une décennie, l'irrigation a fait son apparition dans des régions situées au nord d'une ligne Bordeaux Valence à la faveur de quelques années exceptionnellement sèches comme l'année 1976 par exemple. La nécessité de rentabiliser l'investissement consenti pour se prémunir contre les aléas climatiques et sécuriser la production, a conduit les agriculteurs à adopter pour la plupart le maïs, culture très exigeante en eau mais qui cependant la valorise bien. Extension et intensification de l'irrigation ont eu des conséquences désastreuses sur les cours d'eau de certaines régions peu équipées en infrastructures hydrauliques, avec des dizaines de km de rivières asséchées. Dans ces mêmes régions ou dans d'autres mieux dotées en barrages réservoirs, les conflits d'usage exercent une pression de plus en plus forte sur la ressource disponible. Cet état de fait génère des situations de crises qui généralement donne lieu à des interdictions d'irriguer. Pour faire face à ces situations de pénuries les agriculteurs adoptent, en fonction de leur niveau d'équipement, des comportements et des stratégies différents pour irriguer leurs cultures. La présence de contraintes à la fois sur la ressource et la disponibilité du matériel font qu'il existe souvent une inadéquation entre besoins en eau de la plante (besoins théoriques) et apports réalisés par l'agriculteur. Un sur équipement permet d'atténuer cette inadéquation. L'agriculteur bénéficiant de cette situation peut en effet allouer l'ensemble de son équipement à une plus grande superficie les jours où l'on peut irriguer. Ces stratégies d'irrigation font peu cas des conditions hydriques du système sol-plante. Reposant souvent sur des règles simples (comme le nombre de jours d'attente de mise en route du matériel en fonction d'un seuil de pluie), ces stratégies conduisent le plus souvent à des apports dépassant quelquefois largement les besoins de la plante en conditions climatiques normales. On mesure alors l'importance des risques environnementaux durant le cycle de culture lorsque les apports d'eau sont élevés est inopportuns (années normales ou humides) entraînant du lessivage d'azote ou durant l'inter saison lorsque des reliquats de fertilisant existent en fin de cycle suite à des apports insuffisants ou hétérogènes au niveau de la parcelle.

Ces risques environnementaux liés aux transferts de substances polluantes sont sous l'étroite dépendance des conditions pedo-climatiques mais aussi des pratiques d'irrigations et de fertilisation, le canon avec enrouleur étant le système d'irrigation par aspersion le plus couramment utilisé en France. Une méthode permettant d'apprécier les chances de rentabiliser ce type de matériel dans des

conditions pedo-climatiques données est proposée dans Mailhol (1994). Elle repose sur l'estimation des coûts actualisés de l'investissement nécessaire pour pallier les éventuels déficits hydriques. Bien que l'hypothèse d'un prix unitaire de la culture (le maïs) faiblement fluctuant autour d'une valeur moyenne sur une durée d'amortissement comprise entre 5 et 10 soit discutable, l'approche s'avère intéressante pour proposer des ordres de grandeur des coûts actualisés ainsi que les superficies nécessaires pour rentabiliser l'investissement avec un seuil de risque fixé.

Les pays en voie de développement (pays du Maghreb en particulier) sont de plus en plus concernés par des conflits d'usage en raison d'un accroissement de la population urbaine et de son niveau de vie. Les conditions climatiques font que l'irrigation est quasiment nécessaire dans ces pays bien souvent confrontés aux problèmes de pénuries d'eau. En raison du coût de l'eau qui tend à croître depuis ces dernières années, l'irrigation n'est que très peu pratiquée sur des cultures aussi importantes que le blé et ce, en dépit d'un encouragement de l'état qui se voit contraint d'importer cette céréale (Mailhol et al, 2004a). Outre le prix de l'eau, c'est le coût relatif à l'énergie requise par le système d'aspersion qui fait que les agriculteurs s'interrogent sur l'intérêt économique d'irriguer le blé. L'irrigation à la planche qui est la technique gravitaire la mieux adaptée au cas du blé n'est guère efficiente en raison d'un mauvais état du nivellement (Zaïri et al., 1998, Mailhol et al, 2004a). Les tentatives de passage du gravitaire, (70 à 80% des superficies irriguées), à l'aspersion, se sont du reste souvent soldées par un échec comme dans la plaine du Gharb au Maroc (Mailhol et al., 1999) pour les raisons évoquées, mais également pour celles relevant de problèmes de maintenance du matériel d'aspersion. Ces échecs, ont d'ailleurs motivé les organismes gestionnaires de l'eau de pays comme le Maroc, à proposer un retour au système gravitaire mais en le modernisant, c'est à dire en le rendant performant d'un point de vue hydraulique et moins pénible quant à sa pratique. Dans ce même pays, et plus particulièrement dans la plaine du Gharb, le système d'irrigation à la raie longue est aujourd'hui envisagé comme vecteur d'évacuation du ruissellement hivernale préjudiciable aux cultures comme le blé ou la betterave à sucre.

Cette problématique de la reconversion des systèmes traditionnels en systèmes dits modernisés, justifie l'intérêt que l'on continue de porter à l'irrigation à la raie (modernisée). Celle-ci s'avère être en effet une alternative intéressante qu'il convient d'analyser tant d'un point de vue des aspects techniques que socio-économiques (Mailhol et al., 2004a). Des recherches sont en cours sur ces aspects là sur le cas du Maroc et de la Tunisie.

Technique réputée économe en eau, l'irrigation localisée est actuellement fortement encouragée par les gouvernements des pays du Maghreb par le biais de subventions conséquentes. Mais en raison d'une mauvaise maîtrise de cette technique relativement sophistiquée, les gaspillages d'eau sont très fréquents (Château, 2003, Slatni et al., 2004). La courbe représentée à la figure 1 faisant référence à un échantillon de 14 agriculteurs implantés sur un périmètre de la Medjerda en Tunisie, témoigne d'une grande variabilité de la maîtrise de ce système nouvellement introduit en Tunisie sans les méthodes d'accompagnement nécessaires à sa bonne utilisation. Des mesures du drainage effectuées sous une parcelle irriguée, peuvent faire état d'un volume utilisé double de celui nécessaire à la satisfaction des besoins de la plante (Slama, 2004).

Un des intérêts majeurs de ce système étant la possibilité d'utiliser des automatismes (programmeurs) avec ajout de fertilisants à l'eau d'irrigation, il est rarement arrêté lorsqu'il pleut. Hormis ces circonstances particulières, un système réputé efficient mais mal maîtrisé, peut être aussi générateur des risques environnementaux. C'est ce que laissent présager les apports massifs que l'on peut constater au regard de la figure 1, les besoins en eau d'irrigation requis pour la tomate étant en moyenne de l'ordre de 600 mm en Tunisie. Généralement les agriculteurs qui maîtrisent bien le système, sont ceux qui l'ont adopté depuis quelques années et qui sont équipés d'un dispositif de stockage (bassin) conséquent leur permettant une certaine autonomie vis à vis du tour d'eau. C'est ce qui semble pénaliser les agriculteurs ayant obtenus des rendements inférieurs à 50 T/ha, les potentialités de la tomate de plein champ en micro-irrigation pouvant, grâce à l'irrigation fertilisante atteindre et dépasser largement les 100 T/ha. Il convient pour cela de bien maîtriser à la fois doses d'eau et d'engrais sous peine d'induire des risques de lessivages probablement à l'origine du plafonnement des rendements constatés à la figure 1. Quant aux problèmes de maintenance ils sont aussi présents que pour le cas de l'aspersion ce qui, conjugué aux contraintes de filtration des eaux de

surface, ne peut qu'engendrer de mauvaises uniformités d'apports (Slatni et al., 2004). Il convient également d'évoquer les contraintes liées à des problèmes de salinité notamment lorsque l'eau utilisée provient d'une nappe même à faible salinité. L'abandon définitif du système gravitaire permettant de lessiver les sels accumulés sous l'action de l'évaporation doit être dans ce cas perçu comme un erreur majeure. A noter également que dans certaines circonstances, la présence d'une nappe salée à faible profondeur justifie des apports d'eau douce supérieurs aux besoins de la plante pour maintenir à une profondeur située au delà de la zone racinaire les possibles remontées de sels.

Bien maîtrisée, l'irrigation localisée demeure toutefois la technique d'irrigation la plus efficace bien adaptée à cultures à faible enracinement, nécessitant des apports fréquents, comme le maraîchage, ou des cultures à faible densité de plantation et à forte valeur ajoutée telle que les cultures fruitières. Comparé à un système en aspersion également parfaitement maîtrisé et supposé apporter une pluviométrie des plus homogène, la pratique de l'irrigation localisée permettrait en théorie de réaliser une économie d'eau de près de 20 %. Ce taux correspond pour l'essentiel à l'évaporation du sol surtout prépondérante en début de cycle en raison de faibles valeurs de l'indice foliaire.

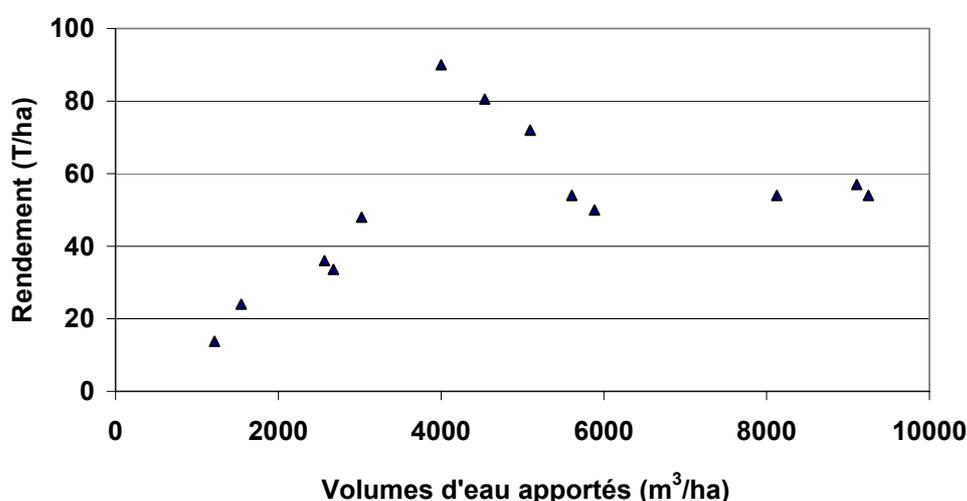


Figure 1 Relation Doses-Rendements obtenus en tomate de plein champ sur un périmètre de la Medjerda en Tunisie en 2003.

En France, Le gravitaire est peu présent (un peu moins de 10% des superficies irriguées) contrairement à l'aspersion (70% des SI). Alors qu'il est majoritairement représenté dans un pays comme les USA (70%). Essentiellement pratiqué en région PACA en raison de conditions topographiques favorables, de conditions ventées peu propices à l'aspersion et d'une infrastructure de canaux existante, le système gravitaire s'est maintenu à la faveur de subventions accordées aux agriculteurs pour le moderniser. Sa modernisation a consisté pour l'essentiel à réaliser le planage des parcelles au moyen de la technique du laser rotatif et à introduire l'usage des matériels de distribution de l'eau en tête de parcelles. L'usage de ces matériels a fortement contribué à réduire la pénibilité de l'irrigation et à améliorer sensiblement l'efficacité des arrosages. (DDA et al., 1989). Les mesures prises par l'Agence de l'eau RMC en faveur du maintien du gravitaire visaient à garantir la pérennité d'un écosystème qui se serait vu menacé suite à la disparition de toute cette infrastructure de canaux, sources d'eau permanente.

Le présent travail de synthèse relate de travaux portant sur le développement d'approches opérationnelles pour une meilleure maîtrise de l'irrigation et de ses impacts. La nature de ces impacts est d'ordre quantitatif, en raison d'une sur exploitation possible de la ressource en eau et environnemental en raison des risques de pollution des nappes souterraines résultant de pratiques d'irrigation et de fertilisation peu efficaces. Nous traiterons pour cela de la problématique des pertes en termes de flux d'eau ou d'azote dans le système sol-plante à l'échelle de la parcelle (1 à quelques

hectares) en liaison avec les pratiques d'irrigation mis en œuvre dans les principaux systèmes d'irrigation adoptés.

L'estimation des flux sous cultures irriguées

La mesure de l'efficacité (ou efficacité) de l'irrigation à l'échelle d'une parcelle est très difficile voire impossible comme l'explique Clemmens (2002) qui suggère le recours à la modélisation en vue de son estimation. Le flux d'eau en deçà de la zone racinaire qui ne contribue pas à l'alimentation de la plante, désigné par le terme drainage, n'est pas une composante du bilan hydrique mesurable en dehors de l'utilisation de cases lysimétriques. L'estimation du drainage sous la zone racinaire est une opération délicate nécessitant la mise en place de tensiomètres pour connaître les gradients de charge hydraulique et de tubes d'accès à la sonde à neutron ou d'autres équipements équivalents (TDR) pour le suivi du stock hydrique. Son estimation à partir des instruments précédents repose sur le modèle de Darcy lequel requiert la connaissance de la conductivité hydraulique du sol au niveau de la zone racinaire, rarement disponible car très délicate à obtenir. Le difficile accès aux caractéristiques hydrodynamiques du sol constitue d'ailleurs le handicap majeur à l'utilisation de l'approche mécaniste fondée sur le modèle de Richards (1931) pour estimer les flux d'eau sous culture irriguée. Cependant les conditions de sol (notamment cultivé) invalident souvent les hypothèses sur lesquelles repose ce modèle (écoulements préférentiels, effets macro-pores).

La difficulté de mise en place et les contraintes du suivi de l'appareillage nécessaire à l'estimation du flux drainant font que bon nombres d'expérimentations se limitent hélas souvent à mesurer le rendement de la culture sous différents apports d'eau sans en expliciter le devenir. Il résulte donc que l'approche fondée sur la modélisation nous paraît une des voix les plus réalistes pour estimer les pertes possibles par drainages et le lessivage des solutés qui en résulte. La modélisation mise en œuvre se veut donc opérationnelle. Cela signifie que les paramètres requis doivent être peu nombreux et facilement accessibles. Elle devra en outre pour les raisons déjà évoquées, intégrer la pratique de l'agriculteur dans le contexte pedo-climatique considéré. Notre effort d'analyse portera enfin sur le maïs, culture dominante et la plus consommatrice en eau.

Le bilan hydrique : Une approche opérationnelle pour évaluer les pertes d'eau sous culture irriguée

Pour le gestionnaire de l'eau comme pour l'agriculteur il est important de connaître quel pourcentage de la quantité H apportée sur la parcelle est réellement utilisée par la plante. Si l'on appelle X cette quantité utilisée, $H-X$ se répartit essentiellement entre une quantité demeurant stockée dans le sol, une autre susceptible de ruisseler hors de limites du domaine irrigué, et/ou une quantité qui draine au delà de la profondeur maximale racinaire. Dans certains cas les quantités restituées à l'atmosphère respectivement par évaporation directe du sol (notamment en début de cycle) et par interception du végétal pendant les apports par aspersion et évaporation directe peuvent s'avérer non négligeables. Si l'estimation des pertes par évaporation du sol (part la plus conséquente des pertes restituées) peut être accessible par la modélisation des processus d'échange au voisinage de la surface du sol (Perrier, 1972 ; Brisson et Perrier, 1991), celles relatives au transport de l'eau depuis la sortie de la buse demeurent délicates. La littérature propose à cet égard des chiffres quelque fois fantaisistes selon les conditions expérimentales qui ont prévalu à ces estimations. Selon Hubert (1992) ces pertes seraient en conditions moyennes inférieures à 5% et atteindraient 15 à 20% en conditions extrêmes (conditions très ventées, très forte demande climatique et température de l'eau $>$ à 20°C). Ces dernières justifieraient en effet les interdictions d'irriguer de jour notamment en plein midi solaire où des conditions de fortes températures se conjugueraient avec de vitesses de vent élevées. Une revue récente de la littérature complétée d'estimations basées sur un calcul de bilan d'énergie relatif à une hauteur et une largeur sous l'influence du système d'aspersion (canon enrouleur, asperseurs fixes ou mobiles), propose des pertes de l'ordre de 15% dans les situations les plus extrêmes (Ruelle, et al., 2004). La forte dépendance de ces estimations au contexte expérimental, justifierait qu'ils soient établis avec des outils adaptés (lysimètres par exemple) dans le contexte même du périmètre irrigué où se pose la question relative aux interdictions d'irriguer de jour sous fortes conditions d'évaporation.

Dans notre modélisation du bilan hydrique nous conviendrons de ne pas tenir compte de ces pertes par évaporation lors du transport de l'eau de même que celle pouvant se produire à la surface du feuillage. Le pas de temps journalier utilisé, toujours pour les raisons évoquées, nous autorise à minimiser l'importance des processus qui régissent la dynamique (difficilement maîtrisable dans le milieu naturel) au profit de ceux qui gouvernent le principe fondamental de conservation de la masse. Ainsi, en irrigation par aspersion, le ruissellement, pur produit de la dynamique nécessitant d'être traité avec les outils et le pas de temps adapté, sera rangé au chapitre des pertes et assimilé au drainage. La quantité d'eau qui ne peut être stockée dans le réservoir sol étant considérée perdue par drainage.

Enfin un terme du bilan suscitant controverse est le terme "remontées capillaires". Il est fréquemment admis qu'en l'absence de nappe à faible profondeur les remontées capillaires susceptibles d'alimenter le réservoir racinaire peuvent être négligées sur parcelle irriguées. Sur la parcelle expérimentale de Lavalette au Cemagref de Montpellier en sol limoneux, seuls les tensiomètres du site conduit en sec font état d'un flux ascendant au voisinage de la base du profil racinaire en fin de cycle. Mais compte tenu de la faible valeur de la conductivité hydraulique à cette profondeur, l'estimation pouvant être faite de ces flux excède rarement les 10% de l'ETR (évapotranspiration réelle) de l'ensemble du cycle (Ruelle, 1995 ; Olufayo, 1994). Dans bien des contextes on peut certes affirmer que l'importance de ce terme est du même ordre que la perte par évaporation du feuillage. Dans ce cas, le fait de ne pas prendre en considération ces deux composantes de signe contraire dans le bilan, porte en soi une certaine justification. En présence d'une nappe à faible profondeur le fait de négliger le phénomène des remontées capillaires peut conduire à de mauvaises estimation du bilan hydrique. C'est sur ce cas particulier que l'approche mécaniste fondée sur le modèle de Richard se trouve être essentiellement justifiée et met en défaut l'approche conceptuelle du bilan hydrique fondée sur l'approche "réservoir". Un compromis quelquefois utilisé par les "modélisateurs", consiste à alimenter la base du ou d'un des réservoirs sol par un flux ascendant calculé au moyen de la loi de Darcy. Il est évident que ce complément se solde par un surcroît de "paramétrisation" préjudiciable au caractère opérationnel caractérisant l'approche conceptuelle.

Tenant compte des justifications apportées à l'élimination de certaines composantes du bilan hydrique ce dernier peut alors s'exprimer selon :

$$R(t) = R(t-1) + P + I - ETR - D \quad (1)$$

,où $R(t)$ représente la réserve hydrique du sol sur la profondeur racinaire, P la pluie I la dose d'irrigation, ETR l'évapotranspiration réelle (évaporation du sol + transpiration de la plante) et D le drainage. Le terme $R(t)$ peut être appréhender selon une approche globale (1) ou compartimentée la tranche de sol sur la profondeur racinaire étant découpées en une série couches d'épaisseur fixée en fonction de l'objectif proposé (transfert d'eau seul ou avec soluté).

Dans un contexte climatique donnée, la consommation maximale d'une culture parfaitement alimentée en eau est appelée ETM (évapotranspiration maximale) et l'on a $ETR \leq ETM$. Certaines méthodes utilisées par les bio-climatologues comme la méthode aérodynamique permettent de mesurer l'ETR d'un couvert végétal (Perrier, 1977 ; Itier, et al., 1994 ; Cargnel et al., 1996). Elles sont cependant lourdes et coûteuses à mettre en œuvre au même titre que la méthode des cases lysimétriques donnant accès à tous les termes du bilan hydrique.

Différentes approches basées sur le bilan d'énergie existent pour estimer la consommation maximale (ou réduite) d'une culture (Itier et al., 1996 ; Alves et al., 1996, Todd et al., 1996). Cependant, celle demeurant la plus utilisée en raison de sa simplicité et du degré de précision quelle permet d'obtenir, repose sur l'utilisation de la formule classique $ETM = K_c \cdot ETP$ où K_c est le coefficient cultural et ETP (ou ET_0) l'évapotranspiration potentielle de référence (référence gazon) calculée à partir des données d'une station météorologique. Les valeurs journalières de la température, l'humidité relative, le rayonnement et la vitesse du vent sont nécessaires au calcul de l'ETP journalière selon la formule de Penman (1948) ou Penman-Monteith (Pereira et al., 1996). En France, ETP peut atteindre des valeurs maximales de l'ordre de 10 mm sous fortes températures et par jour de mistral. Des valeurs plus courantes de 3 à 6 mm/j se rencontrent fréquemment sur un cycle cultural. Le

coefficient K_c évolue au cours du cycle avec l'indice foliaire appelé LAI. Ce dernier s'interprète aussi en terme de rapport entre rayonnement incident et rayonnement intercepté. Cette interprétation est du reste à l'origine d'appareil de type Piquelios permettant une estimation au champ du LAI. Ce dernier est donc tributaire des conditions environnementales (thermiques essentiellement pour une culture bien fertilisée), et des modèles de cultures comme CERES, (Richie et al., 1986), Stics (Brisson et al., 1998) ou Pilote Mailhol et al., 1997c) permettent de simuler l'évolution du LAI et par là même celle du K_c .

Le LAI évolue selon une courbe en "cloche" de 0 au moment de l'émergence jusqu'à atteindre des valeurs de 4.5 à 5 m^2/m^2 au voisinage de la floraison pour une culture comme le maïs sans restriction hydrique (Figure 2). Il décroît ensuite plus ou moins lentement (selon le niveau de disponibilité hydrique) au cours d'une période appelée sénescence après avoir atteint un pseudo-pallier pouvant durer 1 à 3 décades. Il convient de savoir que la consommation maximale est atteinte dès que le LAI dépasse la valeur de 3.5. Quoique d'un point de vue théorique K_c soit borné supérieurement à 1, la littérature et bon nombre d'études ayant trait à la consommation des plantes attestent de valeurs souvent supérieures à relier entre autre aux conditions environnementales (importance des effet d'advection, développement vertical plus ou moins important de la culture...). Les valeurs de K_{cmax} généralement proposées pour le maïs varient de 1.15 à 1.2 en zones cultivées sous nos latitudes.

Lorsque la disponibilité de l'eau pour la plante diminue, celle-ci réduit son flux évaporatoire. En cours de journée cela peut se traduire par un enroulement des feuilles lequel induit une chute brutale du LAI. Cet fait constaté milite en faveur de la formulation adoptée pour simuler le LAI dans le modèle PILOTE comme nous verrons ultérieurement. Le passage d'ETM à ETR se fait communément par une réduction de type linéaire assujettie à un seuil. Ce seuil est relatif à un niveau de remplissage (Dorembos, et Kassam, 1979) dans le cas de l'approche "réservoir" ou à un niveau de tension de l'eau dans le sol (Feddes, 1978). Selon l'approche réservoir il d'usage de se référer au concept de réserve facilement utilisable $RFU = K_r RU$, ou RU est la réserve utile : différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent exprimée en mm/m de sol et K_r un coefficient variant entre 0.55 et 0.67 selon le type de culture et le régime d'évaporation imposé par le contexte climatique. La plante puise en priorité dans la RFU à l'ETM et le manque pour satisfaire cette valeur d'ETM est prélevé avec réduction linéaire à partir du seuil $RS = RU - RFU$ également désigné réserve de survie ou réserve difficilement utilisable. Selon l'équation (1), le drainage en fin de pas de temps est la quantité ne pouvant être stockée dans le réservoir $R_{max} = P_x \cdot RU$, où P_x est la profondeur racinaire maximale de la culture. Dans cette évaluation globale de l'eau dans le sol une légère majoration de P_x peut être un artifice permettant sans paramètre supplémentaire de prendre en compte de façon indirecte les éventuelles remontées capillaires.

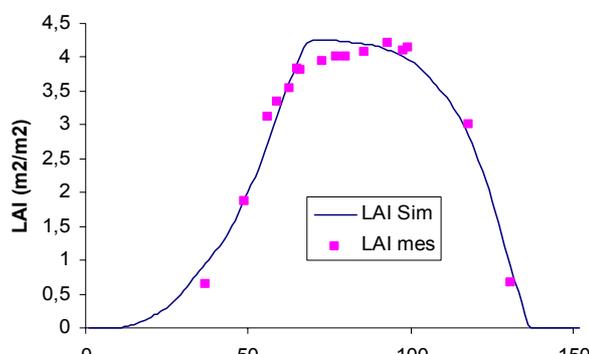


Figure 2. Exemple d'évolution du LAI du maïs conduit à l'ETM sur la parcelle de Lavalette en 1998 (Simulation par le modèle PILOTE et observations ponctuelles)

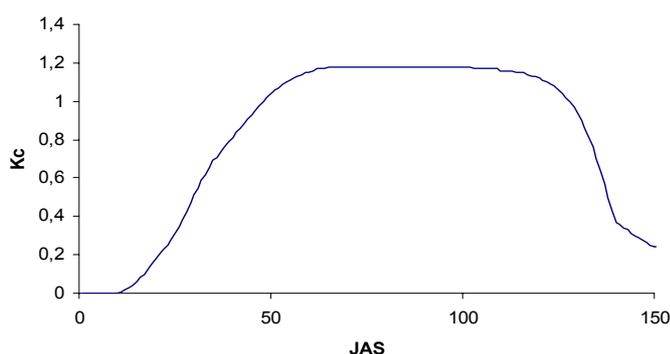


Figure 3. Evolution du Kc du maïs conduit à l'ETM à Lavalette en 1998 (Simulation modèle PILOTE)

Le ratio entre quantité d'eau réellement utilisée par la plante et quantité d'eau fournie à la parcelle peut être considéré comme un critère d'efficacité de l'irrigation ou d'efficience. Eu égard à l'importance des pratiques d'irrigation dans la genèse des flux sous zone racinaire, il apparaît donc nécessaire de prendre en compte le type de matériel utilisé dans un système d'irrigation donné en fonction de sa représentativité dans le contexte français ou étranger. Ainsi traiterons nous du canon associé à l'enrouleur qui en aspersion est l'appareil le plus largement utilisé en France. Son niveau d'efficience est très variable en fonction des conditions d'utilisation (effet du vent, réglage des vitesses d'avancement,..). L'utilisation des systèmes modernes de distribution de l'eau en tête des raies (rampes à vannettes, gaines souples) a considérablement contribué à la réduction de la pénibilité du travail (Etude ARTHEMIS, DDA et al., 1989, Platon et Mailhol, RE/1995) et à améliorer de façon significative l'efficience de l'irrigation (Fig.4). C'est ce type de matériel que nous considérerons sur le cas du gravitaire. Le terme I de l'équation (1) sera donc calculé en liaison avec le système et la pratique d'irrigation et présentera donc une variabilité plus ou moins importante qu'il conviendra d'appréhender à l'échelle de la parcelle.

L'efficience de l'irrigation et sa variabilité selon les systèmes d'irrigation

En s'appuyant sur les définitions proposées par Burt et al., (1997) et après avoir quantifié les différentes composantes du bilan hydrique on peut définir l'efficience d'irrigation

$$EI = \frac{\text{Volume d'irrigation dont a bénéficié la plante}}{\text{Volume d'eau délivré à la parcelle}} \times 100\%$$

EI est le reflet de ce qui se passe sur une période donnée, par exemple sur un cycle cultural, plutôt que lors d'une irrigation particulière.

De nombreuses méthodes permettant d'évaluer un système d'irrigation se limitent aux performances d'un événement ou de plusieurs événements. Dans ce cas l'efficacité d'application EA est le terme le plus approprié pour évaluer un événement. Selon Burt et al., (1997) :

$$EA = \frac{\text{Dose moyenne contribuant à l'apport de la dose requise}}{\text{Dose moyenne appliquée}} \times 100\%$$

Cette définition sous entend que la dose requise sera éventuellement bénéfique pour la culture. Il en résulte que EA est réduite dès lors que le coefficient d'uniformité de l'infiltration CU sur la parcelle :

$$CU = \text{DMI} / \text{dose moyenne infiltrée} \times 100\%$$

, où DMI est la dose minimale infiltrée est faible témoignant d'une inégalité des apports qui réduit le bénéfice de l'apport requis. Définition et concept proposés par Burt et al (1997) conduisent à considérer que l'eau infiltrée et stockée dans le sol durant une irrigation est neutre vis à vis du fait qu'elle puisse être ou ne pas être éventuellement bénéfique pour la culture. On sait par exemple que la recharge du sol en humidité sous la zone racinaire par percolation, peut permettre et favoriser les remontées capillaires en période de déficit hydrique élevé dans la zone racinaire.

En irrigation gravitaire, on fait également souvent référence au rendement hydraulique net (Rn) pour caractériser l'efficacité d'un arrosage. A l'échelle d'une raie irriguée, on définit Rn comme étant le rapport de la dose minimale infiltrée (localisée à l'extrémité de la raie selon la pratique avec ruissellement en colatures) sur la dose totale délivrée.

Un des paragraphes de l'article de Clemmens traite de la question 'quelles efficacités peut on obtenir ?' sous entendu avec différents systèmes d'irrigation. La figure 4 ci après donne un aperçu des niveaux d'efficacité possibles selon différents systèmes d'irrigation. Elle est assez conforme aux propos tenus par Blaine R. Hanson dans la journal de California Agriculture (Sept-Oct 1987) au sujet des performances des systèmes d'irrigation.

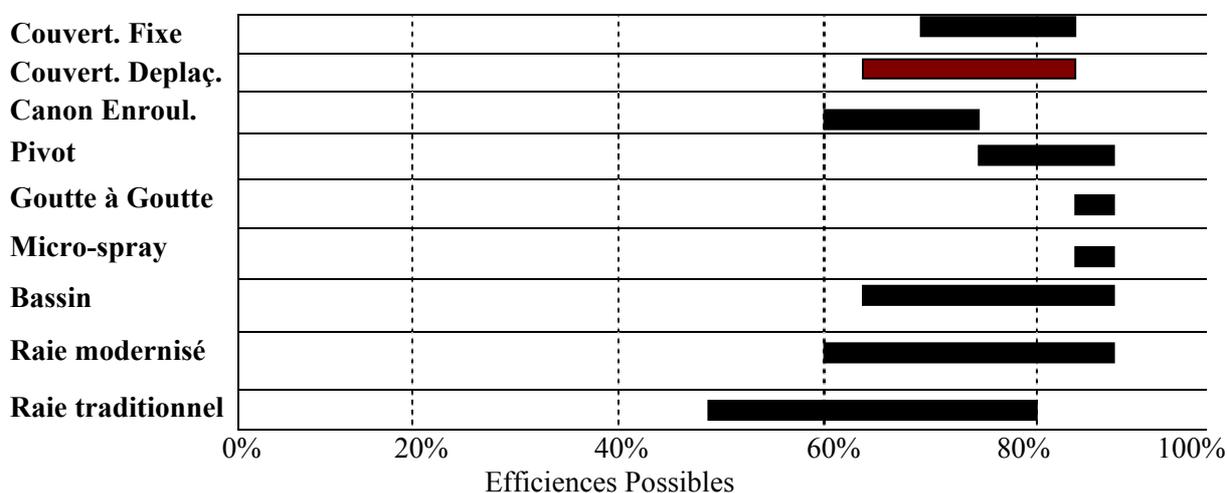


Figure 4 : Efficacités d'application possibles pour différents systèmes d'irrigation (d'après Clemens, 2002).

Asperseurs fixes ou mobiles

Pour caractériser l'efficacité d'un système d'aspersion on parle plutôt d'uniformité de distribution UD. En fait on assimile pour le cas de l'aspersion UD à CU quoique la définition donnée précédemment pour ce dernier se réfère davantage au gravitaire. Les systèmes d'aspersion fixes ou que l'on doit déplacer manuellement, permettent d'atteindre des uniformités moyennes de 70%

lorsqu'ils sont parfaitement conçus et bien entretenus. Cependant l'efficacité chute rapidement en présence de vent et en conditions de faible pression et lorsque l'écartement des asperseurs est mal adapté. Une efficacité de 70% aurait été mesurée selon Blaine avec un système manuellement mobile dans de bonnes conditions de pression et de vent. Alors que des efficacités de 40% auraient également été mesurées dans de mauvaises conditions d'utilisation en Californie. Au mieux ce système selon ce même auteur générerait 20% de pertes par drainage profond. Des essais effectués au champ chez un échantillon d'agriculteurs par Dubalen (1993) mettent en évidence les causes majeures de faible performance d'irrigation (Tableau 1). L'espacement des asperseurs et les variations de pression sont à l'évidence les cause majeures de faibles performances.

Tableau 1. Causes majeures de faibles performances d'irrigation à partir de mesures effectuées au champ en France : le cas de l'aspersion à postes fixes (d'après Dubalen, 1993)

Problèmes	% d'observations
Dose apportée par rapport à dose prévue	
10-20% différence	25
Différence > 20%	34
Faible uniformité due à un espacement Excessif	65
Variation de pression	56
Asymétrie de l'angle mouillé	70

Le canon avec enrouleur

Le canon enrouleur a des efficacités maximales atteignant à peine 75% d'après les résultats consignés en figure 4. L'usage de matériels mal réglés ou usagés en conditions ventées donnent lieu à de mauvaises efficacités résultant d'une forte hétérogénéité d'application des doses. Dans le cadre du projet européen NIWASAVE (Cemagref et al., 1999), qui se proposait d'étudier l'impact des hétérogénéités dues au vent et au matériel sur les risques environnementaux (drainage et lessivage d'azote), les simulations dans le cas du canon attestent de valeurs beaucoup plus élevées très souvent supérieures à 85%. Cependant, outre celles relatives au vent, les conditions dans lesquelles fonctionnaient le matériel étaient supposées quasi idéales. Des données acquises sur le terrain par Dubalen (1993) en France ont permis d'identifier les causes majeures de mauvaises performance de l'irrigation dans le cas de l'enrouleur (Tableau 2). On constate souvent que ces causes résultent d'une mauvaise utilisation de l'appareil (espacements inadaptés, vitesse irrégulière) et d'une absence de contrôle des doses réellement délivrées (Pereira et al., 2002). Des résultats quelque peu similaires ont été obtenus aux USA par Pitts et al. (1996). Il convient d'ajouter que lorsque la maintenance du matériel ne peut être assurée, ces performances ont tendance à se dégrader comme le montrent Louie et Selker (2000). La tendance actuelle visant à doter les canons enrouleurs d'une régulation automatique devrait permettre d'améliorer significativement les performances de ces systèmes d'arrosage.

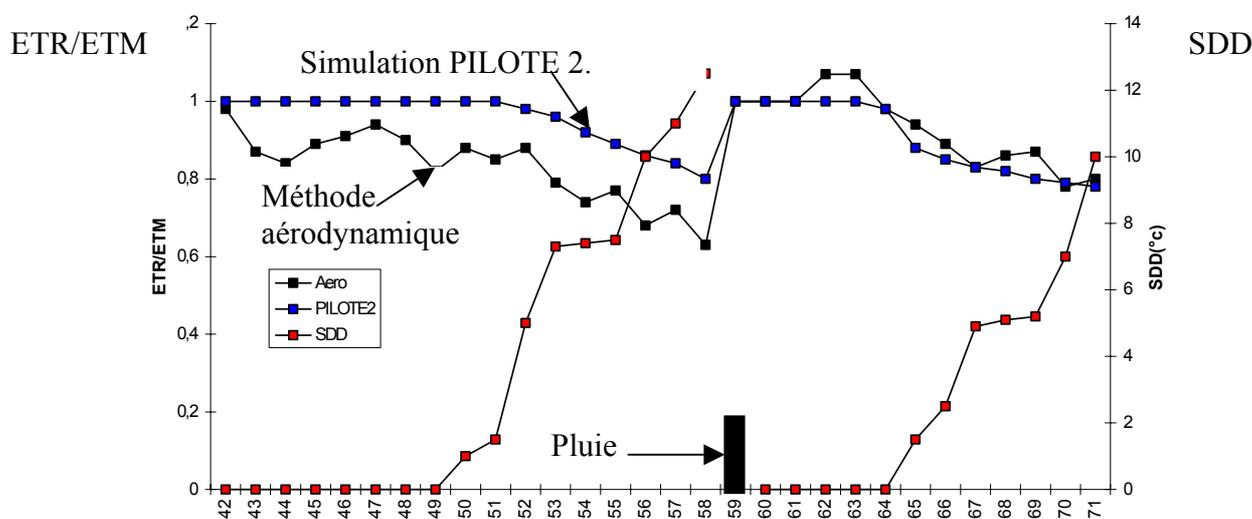
Tableau 2. Causes majeures de faibles performances d'irrigation à partir de mesures effectuées au champ en France : le cas de l'enrouleur (d'après Dubalen, 1993)

Problèmes	% d'observations
Dose apportée par rapport à dose espérée	
10-20% différence	30

Différence > 20%	46
Faible uniformité due à un espacement excessif	65
Asymétrie de l'angle mouillé	59
Variabilité de la vitesse d'avancement	39
Pression insuffisante	38
Pression excessive	10

Un exemple d'approche opérationnelle pour simuler le bilan hydrique et le rendement d'une culture: le modèle PILOTE.

La première version du modèle PILOTE a été proposée au début des années 90 dans l'objectif de piloter en temps réel les arrosage (d'où le nom PILOTE). Cette première version comportait 2 réservoirs en phase de croissance, un premier réservoir dit réservoir racinaire (évolutif) et un réservoir recueillant le surplus du premier dit réservoir de drainage. En phase de croissance terminale on passait donc d'un système à 2 réservoirs à un système à un seul réservoir de capacité Resmax précédemment défini. Sur la base de nos expérimentations conduites à Lavalette sur grande culture, ce système à deux réservoirs a montré ses limites. Il s'est en effet avéré inadéquat pour simuler de façon satisfaisante des durées de confort hydrique faisant suite à des apports d'eau modérés délivrés dans des conditions de stress hydriques élevées confirmées par des niveaux de réserve hydriques très faibles. En effet selon cette première version, seul le jour de l'apport l'ETR égalait ETM étant donné qu'un apport d'eau de l'ordre de d'une trentaine de mm ne permettait pas de franchir le seuil R_s et permettre d'alimenter la RFU dans les conditions du sol de Lavalette ($R_U = 180 \text{ mm/m}$). La solution retenue et explicitée dans Mailhol et al., (1996d) pour assurer le maintien d'un niveau de confort hydrique pendant un certain nombre de jours en accord avec des indicateurs tels que la température de surface ou les mesures aérodynamique effectuées au dessus du couvert, fut d'introduire un réservoir de surface de profondeur fixe P_s et de capacité maximale $R_{x1} = P_s.R_U$. Le suivi des indicateurs (Fig 5) après apports d'eau (35 mm) a permis de proposer une valeur de 10 cm pour P_s qui est devenu par la suite un paramètre fixé a priori dans le modèle. Le gain apporté par cette modification est nettement perceptible au regard de la figure 6 représentant les ETR simulées et obtenues à partir de la méthode du plan de flux nul (Vachaud et al., 1978).



JAS

Figure 5. Validation expérimentale sur une culture de sorgho à Lavalette de la verslon PILOTE 2.(SDD = seuil degré day, Aéro : suivi de l'ETR par la méthode aérodynamique)

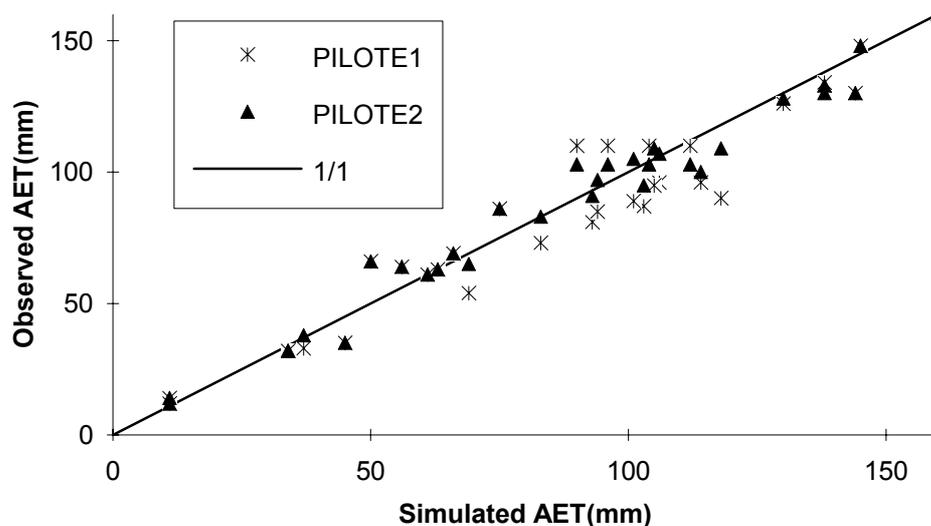
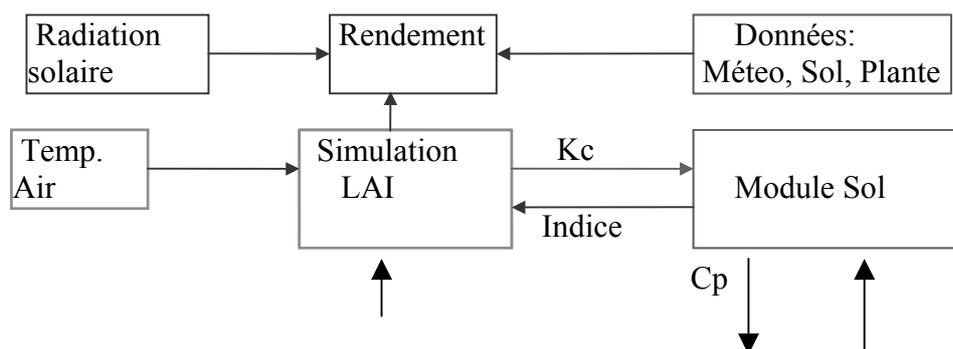


Figure 6. Améliorations apportées au module sol dans la simulation de l'ETR sur sorgho (1990 et 1992) à Lavalette sur courtes périodes (10-30 jours).

La version 3 de PILOTE (Mailhol et al., 1997) représentée à la figure 7 ci après, outre l'estimation du bilan hydrique, propose celle du rendement. L'originalité de cette approche du rendement réside d'abord dans la façon de simuler le LAI et sa modulation régie par un niveau de stress hydrique calculé par le module sol (version PILOTE 2.). L'approche différentielle (Eq (2) s'étant avérée plus performante a été préférée à l'approche intégrale (basée sur l'accroissement potentiel du LAI que multiplie un facteur d'indice de stress) pour simuler l'impact du stress hydrique sur le rendement. Elle est en outre en accord avec les observations évoquées précédemment concernant la réduction de la surface foliaire lors de périodes de stress hydrique ainsi qu'avec le type de mesures que l'on peut effectuer avec un appareil basé sur le principe de l'interception lumineuse.



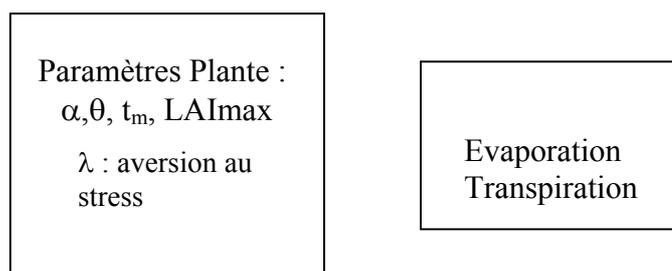


Figure 7. Représentation schématique du modèle PILOTE

Le principe de calcul de la matière sèche potentielle Y_m repose sur des approches classiques de la littérature permettant de relier la matière sèche aérienne au cumul de radiation solaire entre émergence et maturité. L'originalité proposée dans PILOTE consiste à multiplier Y_m par le rapport entre la valeur du LAI moyen du traitement bien alimentée en eau (à l'ETM) à celle du traitement considéré. Ces valeurs sont toutes deux calculées entre deux périodes critiques du cycle, définies en seuils de températures cumulées depuis le semis. Enfin une autre originalité porte sur le passage de l'indice de récolte potentiel HI_{pot} à l'indice de récolte réel Hir pour des cultures où HI_{pot} s'avère être sensibles aux effets de stress hydriques élevés. Le principe de la version 3 de PILOTE est reprise de façon plus détaillée à l'annexe 1. Elle est plus complète que celle initiée sur le cas du sorgho et du tournesol (Mailhol et al., 1997) pour le calcul du rendement. Dans cet article le cumul de la température s'effectuait sur un nombre de jours après semis, ce qui avait pour inconvénient de limiter l'approche à des conditions climatiques données (aspects thermiques). Comme on pourra le constater les résultats des simulations sur 5 années (entre 1997 et 2002) sont très satisfaisants tant au niveau des rendements (Fig. 6a et 6b) que du bilan hydrique (Fig. 7a et 8a) pour un nombre de paramètres relativement faibles notamment concernant ceux relatifs au sol (RU essentiellement). La plupart, tels ceux relatifs à la plante sont accessibles dans la littérature (LAI_{max} , températures des stades végétatifs) ou facilement identifiables dans le cas de nouvelles cultures comme expliqué dans l'article cité.

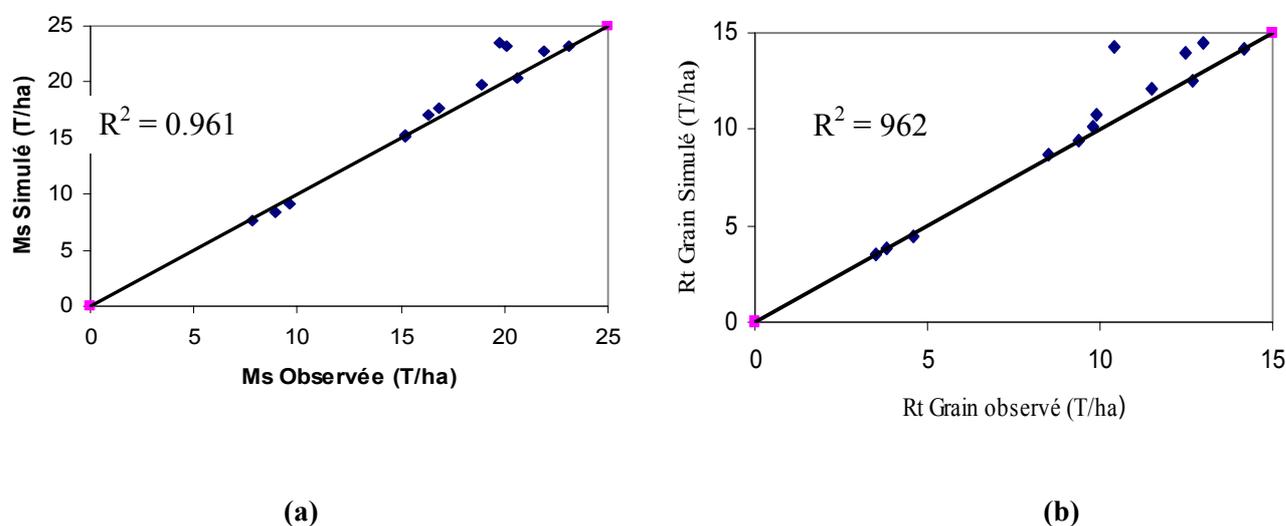


Figure 6. Validation des rendements en matière sèche (a) et en grain (b) simulés par PILOTE sur le cas du maïs (variété SAMSARA, $T_{mat} = 1925$ °, $T_{flor} = 1005$ °) à Lavalette (1997-2002).

Des variantes au module sol comme l'approche multicouches ont été tentées dans le soucis de vérifier que selon cette approche il était possible de simuler correctement le niveau d'humidité observé dans certaines conditions au niveau des couches les plus profondes. Un taux d'humidité relativement élevé au niveau des couches profondes accroît les risque de drainage et de lessivage d'azote pour les modèle traitant de cette problématique comme le modèle Stics (Brisson et al., 1998). La variante multicouche peut être développée de deux manière. La première qui est celle choisie, consiste à se donner une fonction de prélèvement racinaire de type trapèze. La décroissance est linéaire depuis une profondeur correspondante à la profondeur d'installation du système racinaire jusqu'à la profondeur $P(t)$ au temps t . Pour une position de front racinaire $Pr(t)$ donnée, une série de coefficients a_i est affectée aux couches d'égale épaisseur contenues entre 0 et $Pr(t)$ telle que $\sum_1^n a_i = 1$. Il est dans ce cas

aisé de comprendre que figer la distribution des a_i quelles que soient les conditions de disponibilité de l'eau au sein des couches n'est pas réaliste. En effet si l'on opérerait ainsi, il suffirait qu'une couche s'avère inapte à la fourniture potentielle de l'eau pour que ETR devienne aussitôt inférieure à ETM. Or les expérimentations attestent qu'il n'en est pas ainsi, ce qui signifie donc que la plante reporte ses potentialité d'extraction vers les couches pour lesquelles l'eau est davantage disponible. Au niveau algorithme de calcul il n'est pas simple de mimer le comportement du système racinaire puisque l'on ambitionne en quelque sorte de traduire les aspects physiologiques de la plante. L'approche proposée dans cette version de PILOTE consiste tout d'abord en début de pas de temps de vérifier si les couches concernées (sur $z = Pr(t)$) peuvent satisfaire ETM. S'il en est ainsi, la distribution des a_i au sein des différentes couches se fait selon la forme prédéfinie (décroissance triangulaire). Dans le cas contraire on procède à un classement en début de pas de temps les couches concernées sur $Pr(t)$ quant à leur niveau de disponibilité en eau et on attribue à celles qui en sont les mieux pourvues les coefficients les plus élevés. Cependant, si l'on ne met pas un frein à ces potentialités d'extraction, de longues périodes sans apport d'eau conduisent à épuiser trop rapidement les dernières couches, fait constaté lors de la comparaison avec les profil neutroniques du traitement en sec à Lavalette. Une façon de contourner la difficulté liée au report des potentialités d'extraction consiste à calculer l'ETR selon l'approche classique de PILOTE puis de répartir cette consommation selon la distribution trapézoïdale. Cette approche qu'il convient de le reconnaître souffre d'un certain manque de rigueur, permet sensiblement de mieux gérer les niveaux d'humidité des dernières couches que l'approche précédente. Cependant, l'une comme l'autre ne permettent pas d'améliorer les performance du modèle et pour certaines années porte atteinte à la simulation du rendement, ce qui témoigne somme toute d'une certaine logique.

On retrouve cette propension à sous estimer la teneur en eau des couches profondes avec Stics sur le cas des sols de la Beauce (Zanolin, 2003). Il ne fait guère de doute que ces couches bénéficient de l'apport significatif des remontées capillaires par le biais des fissures de la craie sur des zones de la parcelle aux sols superficiels. Mais quel type de modèles et moyennant quel effort de "paramétrisation" permettraient il de simuler efficacement de tels phénomènes ? Les modèles type MACRO (Larson, 1999) pour signifier cette classe les modèles permettant de simuler les transferts rapides d'eau et de solutés dans les sols à effet macro-pore manifestes. Cependant, demeure le problème du calage des paramètres régissant les échanges entre macro et micro porosité et leur caractère difficilement prédictible (il est d'autant plus quand la macro porosité évolue avec la teneur en eau : cas de la plupart des argiles) limite quelque peu l'usage de ces approches aux sites bien instrumentés (notamment en ce qui concerne les drains récepteurs) ayant permis leur calage.

Des modèles également basés sur l'approche capacitive tels que Stics, certes plus ambitieux car traitant aussi de la problématique de l'azote contrairement à PILOTE, ne donnent pas des résultats aussi satisfaisants sur le site de Lavalette sur les aspects eau et rendements ($R^2 \cong 85\%$) en dépit d'efforts conséquent consacrés au calage des nombreux paramètres. Quand aux résultats liés à l'azote les travaux effectués dans le cadre de la thèse de Nemeth (2001) tendraient à montrer que des efforts sont encore nécessaires pour traiter de façon conjointe de la problématique eau-azote en aspersion comme en gravitaire dans le continuum sol-plante-atmosphère au moyen de la modélisation.

Un des intérêts de la modélisation, outre celui de prédire les caractéristiques requises avec une certaine fiabilité, c'est de contribuer à la compréhension des phénomènes. Ce souci est fort louable mais force est de constater qu'il se solde généralement par une pléthore de paramètres. C'est souvent la conséquence logique de l'assemblage plus ou moins bien réussi d'un ensemble de tiroirs fourni par chacun des spécialistes ayant apporté sa contribution à l'édifice, lequel, selon notre avis se doit d'être exclusivement réservé au domaine de la recherche.

Lorsque l'objectif se limite à la simulation du bilan hydrique au pas de temps journalier, l'approche mécaniste Hydrus-1D (Simunek et al., 1999) fondée sur le modèle de Richards ne s'avère pas meilleur que celle proposée par le modèle PILOTE dans le contexte de Lavalette (cf paragraphe à venir) au regard des figures 7a et 8a. Les paramètres hydrodynamiques du sol présentés à l'annexe 2 (K_s et les 4 paramètres de la courbe de rétention de van Genuchten) ont été déterminés par la méthode du drainage interne (Vachaud et al., 1978) ainsi que par méthode inverse. La méthode est d'autant plus lourde à mettre en œuvre que l'on se trouve en présence de 3 couches de sol, ce qui porte à 15 le nombre de paramètres à caler. La profondeur simulée est de 2 m afin de prendre en compte l'éventuel effet des remontées capillaires. Une condition de drainage libre est imposée à la base du profil alors que les conditions atmosphériques régissent la partie haute. Pour les deux traitements considérés (ETM et sec), l'accroissement racinaire introduit dans Hydrus repose sur l'évolution du plan de flux nul obtenue à partir des tensiomètres. La profondeur maximale d'enracinement P_x est respectivement fixée à 1.2 m (comme pour PILOTE) pour l'ETM et 1.3 pour le sec. Le module d'extraction racinaire proposé par Hydrus (Cf annexe 2) repose sur le modèle de Feddes (1978) pour estimer l'ETR (avec seuils des tensions relatifs au maïs) combiné à une courbe de densité racinaire.

La simulation démarre deux jours avant le semi effectué le 147^e jour et les conditions initiales du sol sont établies à partir des relevés tensiométriques. Les conditions aux limites variables constituées par l'évaporation du sol et la transpiration potentielle sont issues des simulations de PILOTE, car Hydrus ne les simule pas. Ce couplage donne globalement un résultat satisfaisant, apportant de fait un certain crédit aux composantes évaporation (début de cycle) et transpiration simulées par PILOTE. On pourra constater que le modèle d'extraction proposé dans Hydrus est plutôt satisfaisant (Fig 7b et 7d) concernant notamment le traitement supposé conduit à l'ETM.

Les plans de flux nuls simulés sont bien au delà de la zone racinaire (PFN à $z \cong 1.55$ m). Les flux simulés entre 110 et 130 cm, caractéristiques des remontées capillaires, sont très faibles, de l'ordre de 0.15 mm/j à peine, en raison peut être d'une relation $K(h)$ inadaptée (le paramètre λ de la formule de Mualem (1976) est fixé à 0.5). Ce constat ne peut donc à lui seul expliquer le fait qu'au voisinage du 250^e jour la simulation d'Hydrus soit plus proche des observations que celle de PILOTE sur le cas du traitement sec.

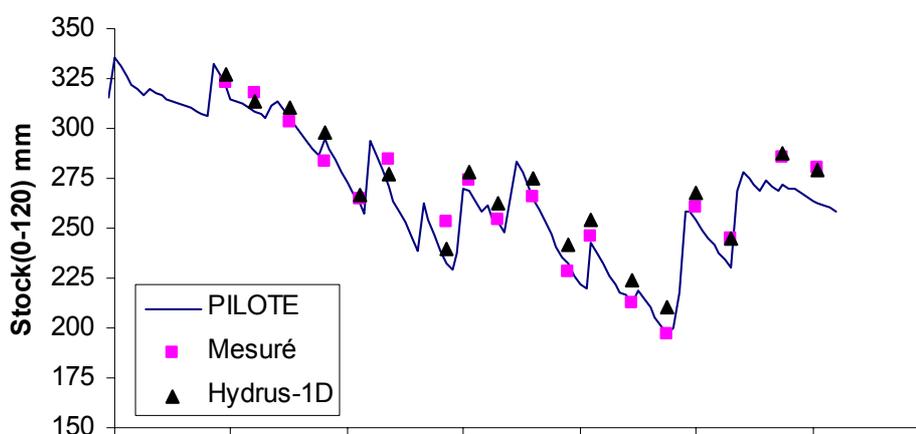


Fig.7a Simulation du stock hydrique (0-120 cm) : Traitement ETM 99 à Lavalette ($F_c = 0.28$
 $W_p = 0.12$)

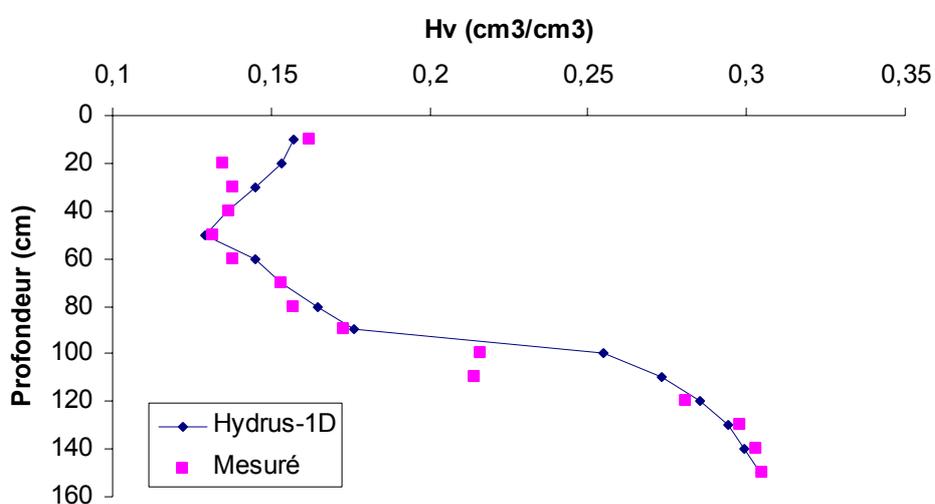


Fig.7b. Profil de teneur en eau au jour 245 : Traitement Etm 1999 à Lavalette

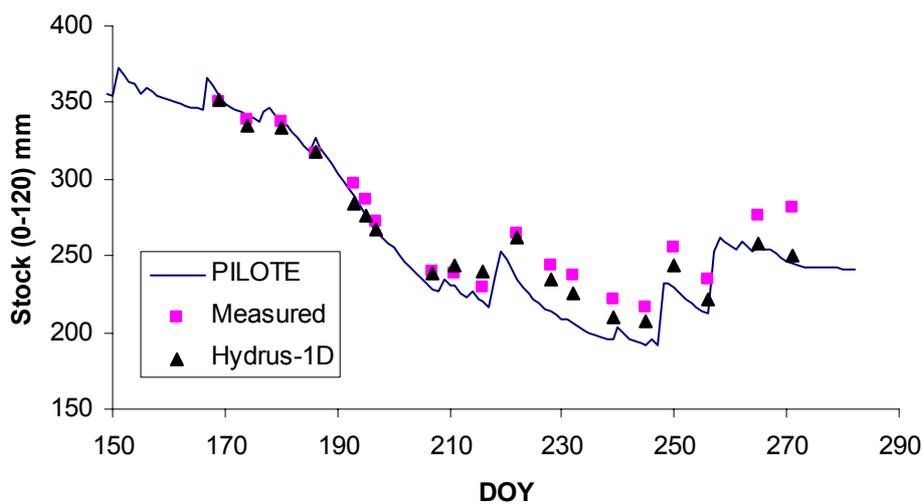


Fig 8a. Simulation du stock hydrique (0-120 cm) : Traitement Sec Lavalette 1999, $F_c = 0.32$, $W_p = 0.14$. Selon progression racinaire observée.

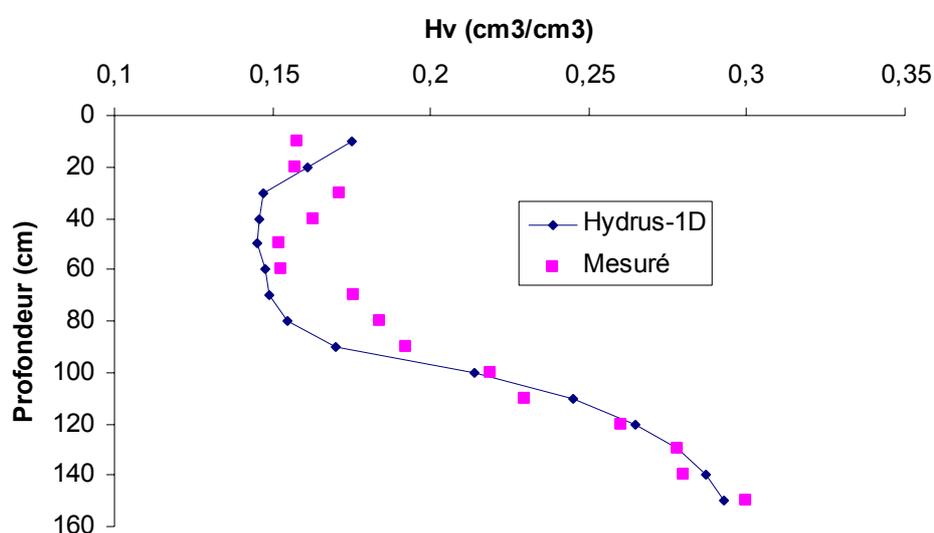


Fig.8b. Profil de teneur en eau au jour 245 : Traitement Sec Lavalette 1999 selon progression racinaire observée.

La nécessité du contexte expérimental : le cas de Lavalette au Cemagref (Montpellier)

Un tel contexte est indispensable non seulement à l'évaluation des stratégies à adopter pour bien valoriser l'eau requise par une culture donnée, mais aussi à la mise en œuvre, au calage et à la validation des modèles de cultures tels que PILOTE ou STICS. Elle peut également servir de référence en matière de doses aussi bien d'eau que d'azote pour un objectif de rendement donné. Ainsi en année moyenne où une irrigation de semis complétée de quelques épisodes pluvieux printaniers permettent d'assurer la levée, une dose d'irrigation totale sur le cycle de l'ordre de 300 mm permet d'atteindre les potentialités du maïs semé fin avril début mai. Cette dose ajoutée à la contribution du sol, de l'ordre de 150 mm, ainsi qu'aux pluies (essentiellement de printemps) d'une centaine de mm, permettent d'approcher les 550 mm qui est la quantité d'eau nécessaire à un maïs de variété semi précoce pour atteindre ses potentialités de production à Montpellier. L'ETM simulée par PILOTE sur une chronique de plus de 10 années (90-2002) affiche une valeur moyenne de 540 mm sur la parcelle de Lavalette que l'on peut considérer comme étant représentative des conditions méditerranéennes. Sur la parcelle conduite à l'ETM le pilotage des irrigations était basé sur un bilan hydrique très succinct susceptible d'être appliqué sans difficulté majeures chez l'agriculteur.

Des doses de l'ordre 30 mm en moyenne appliquées dans ce contexte de sol profond donnent lieu à une absence totale de drainage durant le cycle de culture. Ces doses sont mesurées dans les pluviomètres disposés dans l'environnement des sites de mesures équipés de batteries de tensiomètres et de tubes d'accès à la sonde à neutron. Le système d'aspersion est une couverture intégrale avec les asperseurs disposés en triangle. Le suivi de l'azote dans le sol s'effectue par prélèvement à la tarière avant apport (150 à 180 U/ha en 2 fois) et en fin de campagne. Les besoins en azote de la plante (230 à 260 U/ha en moyenne) sont largement satisfaits puisque les conditions initiales font souvent état d'un stock initial disponible proche des 80 U/ha et que la minéralisation durant le cycle atteint en moyenne des taux de l'ordre de 1 kg/ha/jour. Les mesures de LAI sont effectuées en moyenne un fois par semaine soit au Piquélios mais également au Licor 2000. Enfin les rendements en matière sèche et en grain sont obtenus sur la base de 7 placettes de 4 m² chacune. Le tableau 3 ci après, extrait de la thèse de Nemeth (2001) donne sur l'exemple de la saison 99 une estimation des composantes du bilan hydrique l'ETR déterminées par la méthode du plan de flux nul pour un maïs semé le 27/05. Comme on peut le constater l'année est plutôt humide et quoique entaché d'une certaine erreur compte tenu de l'intervalle considéré, le drainage peu être considéré comme nul sur les sites en sec et à l'ETM, faible sur le traitement 0N. On constate qu'en effet les remontées capillaires ne sont pas négligeables selon ce mode d'estimation.

Concernant les bilans d'azote, les tableaux 4 et 5 mettent en évidence l'impact des pluies sur les risques de lessivage. Celles de fin de cycle et de début d'automne sont responsables du lessivage en 1999, le même type de bilan établi du semis à mi-Août attestant aucun lessivage quelque soit le traitement. Un calcul d'erreur succinct (Nemeth, 2001) montre cependant que l'incertitude absolue sur le bilan peut être de l'ordre de 40 kg/ha. Cela peut expliquer le lessivage que l'on obtient en 98 sur le site ETM alors que l'on a la certitude qu'il n'y a pas eu de drainage sur ce traitement. Cette année là, l'apport de 200 kg/ha fort probablement surestimé, n'avait pas été mesuré selon la technique des cuvettes comme en 1999 (un apport de 90U, -1JAS et 80U, +35 JAS). Les valeurs obtenues de lessivage en 1999 sont accompagnées d'hypothèses sur les vitesses de minéralisation (*) constantes sur toute la période ou diminuant de moitié le dernier mois (**).

Tableau 3. Résumé du bilan hydrique calculé pour une profondeur de 140 cm sur 3 sites en aspersion à Lavalette en 1999 entre le 10/06 et le 5/10 (récolte)

Site	Stock initial	Stock final	Pluie	Irrigation	ETR	Drainage ou rem. Capillaires
ETM	376	345	232	211	486	-12
0N	414	423	232	254	443	34
Sec	423	352	232	7	366	-55

Tableau 4 Bilan d'azote estimé en 1998 en aspersion

Site	Stock initial	Stock final	apport	minéralisation	plante	pertes
ETM	108	86	200	68	347	42
0N	100	77	0	68	91	0
Sec	127	436	200	68	104	-146

Tableau 5 Bilan d'azote (kg N/ha) estimé en 1999 en aspersion

Site	Période	Durée (j)	Stock Ini	Stock fin	apports	plante	lessivage
ETM	25/05-9/11	167	147	122	150	262	44**/81*
0N	25/05-12/10	140	130	127	0	79	65
Sec	28/04-9/11	195	192	124	88	177	160**/185

Du travail de thèse de Nemeth (2001), il ressort que le modèle STICS, simule de façon assez satisfaisante ($R^2 = 0.805$) la teneur en azote dans la plante sur les 3 années 1997-1999. Dans le cas de stress azoté (traitement 0N) la teneur en azote dans la plante est nettement surestimée. La minéralisation simulée en 1999 de 142 kg N/ha entre le 25/05 et 11/11 est assez voisine des estimations, lesquelles varient entre 153 et 168 kg/ha. En revanche le lessivage est sous estimé par rapport aux valeurs déduites du bilan azoté. Par exemple sur le site ETM, le lessivage simulé n'est que de 7 kg N/ha alors que la valeur estimée est d'environ 63 kg N/ha. Compte tenu des différentes sources d'imprécisions il semble difficile de conclure en proposant des chiffres fiables concernant ces sous estimations possibles. Comme précédemment indiqué, seules les mesures effectuées en cases lysimétriques ou à défaut par la technique des bougies poreuses (encore qu'il faille selon certains chercheurs en disposer d'un certain nombre pour fiabiliser les résultats) peuvent permettre d'avancer des chiffres crédibles.

On retrouve les conclusions du projet européen NIWASAVE, concernant le lessivage en sols profond, à savoir un risque prononcé de lessivage en cas de sous irrigation à la faveur des pluies d'Automne, et ce en dépit d'apports azotés modérés (88 kg N/ha).

Analyse des risques environnementaux résultant d'une pratique d'irrigation au canon enrouleur en sols superficiels de Charente.

Aspect gestion et valorisation de l'eau avec le modèle GESCAN

Les études liées à la construction du barrage de Mas Chaban sur la Charente visant à améliorer la gestion de l'eau dans un bassin où la pression sur la ressource est élevée, ont conduit à l'analyse des pratiques d'irrigation en vue d'estimer la consommation en eau des cultures où le maïs est très fortement représentées. Le système largement utilisé pour l'irrigation du maïs dans cette région est le canon enrouleur. L'analyse des pratiques a permis de dégager une stratégie d'usage du matériel d'irrigation tenant compte des contraintes propres à l'exploitation (disponibilité du matériel) et des interdictions d'irriguer (Chalazon, 1995 ; Labbé et al. 1997 ; Labbé et al., 2000). Cet ensemble de contraintes, allié à une règle de décision par rapport à la pluie (durée d'arrêt suite à une pluie) et à la période définie des arrosages (date de la 1^{ère} irrigation et date de la dernière irrigation) permet de simuler dans le cas du canon enrouleur (Mailhol et Ruelle, 1999) l'évolution de la demande en eau ainsi que les pertes par drainage sur une chronique d'années disponibles.

Le modèle GESCAN mime les passages successifs de l'enrouleur alloué à l'irrigation d'une parcelle d'une dizaine d'hectare. Compte tenu de la vitesse d'avancement de l'appareil et de la portée du jet, une certaine bande de superficie A_i ($i = 1, n$ bandes) est arrosée quotidiennement. La dose délivrée à chacune des n bandes est une entrée de PILOTE. Les données climatiques sont obtenues à la station météorologique la plus proche et quelque fois même l'agriculteur dispose comme il est conseillé d'un pluviomètre sur son exploitation. Le temps nécessaire pour repositionner le canon en début de parcelle après arrosage de celle-ci peut être d'une semaine ou quelque fois plus. Lorsque intervient une pluie jugée conséquente l'appareil peut être remis ou non en début de parcelle. Selon l'importance de cette pluie un certain nombre de jours d'attente s'en suit avant le redémarrage de l'engin. Le déclenchement des irrigations se fait généralement au voisinage de la mi Juin et c'est la règle adoptée vis à vis de la pluie qui régit les irrigations (report de l'irrigation d'un jour pour 7 mm de pluie). Conscient des risques de drainage, les agriculteurs délivrent des doses souvent inférieures à 30 mm. Compte tenu de la faible capacité de stockage du sol, et selon l'importance de la superficie à laquelle est alloué l'appareil, il peut en résulter un stress hydrique aux niveau des premiers passages lorsque l'appareil termine d'arroser la parcelle. On comprend aisément qu'avec un faible niveau d'équipement l'agriculteur ait du mal à satisfaire certaines années à forte demande climatique les besoins en eau de sa culture surtout lorsqu'il est par ailleurs sujet comme c'est souvent le cas en Charente aux interdictions d'irriguer. Cet aspect est du reste pris en compte dans le modèle GESCAN notamment lors de la validation de l'outil.

Le modèle GESCAN a été validé sur l'année 97 à partir de la connaissance des volumes délivrés au compteur et du rendement obtenu en maïs. Les interdictions d'irriguer connues, sont prises en compte par le modèle. La simulation effectuée sur l'ensemble du cycle cultural au moyen du modèle GESCAN sur une dizaine d'années (1986-1997) montre qu'en moyenne et sous l'hypothèse d'absence d'interdictions d'irriguer (futur scénario après mise en fonctionnement du barrage), les quantités d'eau requises pour le maïs en Charente sont de l'ordre de 300 mm sur sols à faible capacité de rétention ($RU \cong 30 \text{ mm/m}$) avec un écart type de 30 mm (Tableau 6). Les coefficients d'uniformité sont en moyenne de 85% (Ruelle et al., 2003), selon le scénario adopté par l'agriculteur (irrigation de jour) et son type de matériel (Nelson SR 100, buse 22 mm sous 5 bars). Les pertes par drainage sur ce même type de sols sont quant à elles de l'ordre de 90 mm avec un écart type de 40 mm.

Sur sols à bonne réserve utile ($Ru > 100 \text{ mm/m}$), généralement situés en bordure de rivière, les quantités d'eau requises sont très significativement plus faibles de l'ordre de 200 à 250 mm et les pertes par drainages peuvent être considérées négligeables. Compte tenu des doses pratiquées sur sols superficiels (de l'ordre de 25 à 30 mm), le drainage peut être la conséquence d'une pluie intervenant peu de temps après un apport d'eau. On constate cependant qu'une règle de pilotage visant à déclencher l'irrigation lorsque la réserve en eau du sol est épuisée à 80% réduit en moyenne de 30 % les pertes par drainage, selon le modèle, sans affecter de façon très significative les rendements du maïs. Selon la pratique de l'agriculteur on constate (Figure 9) une tendance à sur irriguer les années moyennes ou humides et à sous irriguer dans le cas des années sèches. Cette difficulté à pouvoir satisfaire à la demande climatique en années sèches témoigne d'un certain niveau de sous équipement. On constate, sur la base de l'échantillon des 10 années étudiées, que les apports moyens sont significativement plus élevés que les besoins théoriques estimés à 240 mm pour les sols superficiels de Charente selon l'étude Cemagref-Diren (1992) relative à un échantillon de 30 années (1960-1989). La figure 9 montre cependant que quasiment une année sur deux, besoins théoriques et apports selon la pratique sont très voisins.

L'ETM moyenne sur les 10 années étudiées est de l'ordre de 580 mm (la durée du cycle étant plus longue qu'à Montpellier) avec des rendements moyens en maïs de l'ordre de 115 qx/ha pour une ETR moyenne de 480 mm. La variété de maïs dominante est SAMSARA, variété semi précoce. Elle requiert dans les conditions de la Charente en moyenne 165 jours pour atteindre la maturité. La première irrigation se situe aux environs du 15 Juin et l'arrêt des arrosages aux environs de la première décade de Septembre.

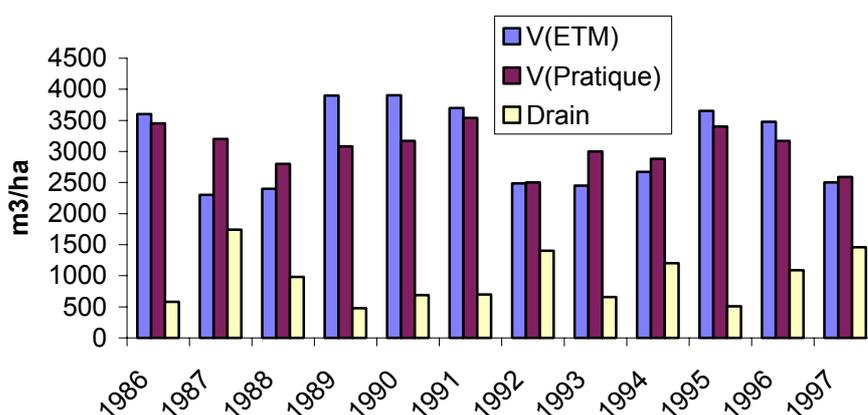


Figure 9. Comparaison des volumes d'eau consommés selon la pratique de référence avec ceux nécessaires pour satisfaire les besoins à l'ETM

La simulation illustre bien le fait que même sur sols superficiels une technique basée sur le pilotage des irrigations peut conduire l'irriguant à faire des économies d'eau significatives à réduire le drainage et par là mêmes les risques environnementaux, liés aux transport de solutés. En outre elle permet de dégager de la disponibilité pour le matériel (dernière colonne du Tableau 6) qui peut être alloué de ce fait aux irrigations d'appoint d'une culture moins exigeante ne eau comme le tournesol ou le sorgho.

Tableau 6 Comparaison de la pratique réelle (mode fréquentiel) d'arrosage à l'enrouleur sur sol superficiel avec une pratique basée sur le pilotage des irrigations (Cv = coef. de variation)

Déclenchement fréquentiel (F = 7j) des arrosages, date 1 ^{ère} irrigation le 15/6 soit au 55 jas (Doses 28 mm)					Déclenchement des irrigations quand la réserve est épuisée à 80% (Doses 28 mm)					
Ans	V m3/h a	Rt T/ha	Cv %	Drain mm	V m3/h a	Rt T/ha	Cv %	Drain mm	Disponibi. Nj (date en jas)	Déb g. (jas)
1986	3450	12.6	3	60	2880	11.5	2	36	4(62), 6(122)	56
1987	3200	12.0	1	174	1960	10.5	8	127	1(114)	72
1988	2800	12.0	3	100	2300	11.6	5	96	12(73)	67
1989	3080	12.6	2	50	3080	12.7	2	44	2(70)	19
1990	3170	7.8	4	70	2500	6.0	4	48	5(75)	51
1991	3540	11.1	3	70	2880	11.4	2	41	26(45)	39
1992	2500	11.4	2	140	1960	10.8	6	100	29(31),19(67)	25
1993	3000	13.2	1	66	2200	12.8	3	40	1(95)	69
1994	2880	11.8	2	120	2000	11.0	8	66	4(126)	57
1995	3400	10.3	2	50	3100	10.5	3	39	4(73)	60
1996	3170	10.3	3	109	2540	9.4	7	33	5(79)	53
1997	2590	13.3	1	150	2017	12.0	5	135	23(58)	47
Moy	3060	11.5	2.3	100	2450	10.8	4.5	67		51
E.t	310	1.5		40	420	1.7		36		16

Le canon enrouleur dans la région de Toulouse sur sol à réserve utile moyenne (Réf. Climatologie Toulouse-Blagnac)

En référence à l'article de Cabelguenne et al., (1982) ayant trait à la valorisation de l'irrigation par quatre grandes cultures nous prendrons le cas d'un sol à réserve utile moyenne de 100 mm. L'article fait état d'une moyenne de rendement proche de 100 qx pour des consommations en eau (ETR) moyennes sur 11 ans (1969-1979) de 520 mm et de rendements de 80 qx pour des consommations de 450 mm. Ces valeurs appartiennent à la fourchette de rendements accessibles en exploitation, leurs valeurs sont aussi liées à la plus ou moins bonne maîtrise des aspects techniques et donc pas seulement à l'eau. Ces informations nous permettent alors d'accorder de la crédibilité aux résultats présentés dans le tableau 6 ayant trait à 3 années climatiques contrastées 1989 année sèche, 92 année humide, et 95 proche d'une année moyenne. Sur l'exemple de l'année sèche, le démarrage de l'irrigation est effectué le 15 Juin, les irrigations ont lieu en moyenne tous les 8 jours en période de pointe avec des doses de 35 mm avec report de l'arrosage de 1 jour pour 7 mm de pluie. Celui relatif à l'année moyenne démarre 10 jours plus tard. On notera, bien que ces simulations n'appartiennent pas à l'échantillon auquel se réfère l'article, une assez bonne concordance des rendements et des ETR. Le démarrage tardif de l'irrigation en 92 (mi Juillet) a limité les risques de drainage sur la période d'irrigation où les pluies ne sont que de 36 mm. Signalons que selon l'étude des besoins en eau Adour

Garonne (Cemagref-Diren, 1992), les besoins en eau moyens du maïs pour la classe de sol ici étudiées (RU = 100 mm) à Toulouse sont de 250 mm.

Tableau 7. Simulation du canon enrouleur sur maïs en région toulousaine (RU = 100 mm)

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1989	350	101	489	640	0	73
1992	140	96	429	580	0	36
1995	280	100	513	620	0	88

Hormis le cas des sols superficiels, les risques en drainage durant le cycle de culture sont faibles pour ne pas dire nul.

Aspect environnemental liés au lessivage d'azote : l'approche NIWASAVE

L'aspect risque environnemental lié au lessivage d'azote sur le cas des sols superficiels de Charente a été étudié au moyen de l'outil développé dans le cadre du projet européen NIWASAVE par les collègues du Cemagref d'Aix en Pce en collaboration avec l'université de Silsoe (UK) d'où est issu le modèle de répartition de la pluviométrie au moyen du canon et de l'INRA d'Avignon pour la partie qui concerne le modèle de culture : le modèle Stics. L'outil décrit de façon détaillée dans Molle et al., (1999) et dans Ruelle et al, (2003), permet de tester l'impact de l'hétérogénéité d'apport au niveau d'une ensemble de « placettes » due au vent, sur les risques de lessivage d'azote durant le cycle de culture et la saison d'inter culture. Outre les données climatiques requises par le modèle Stics (équivalentes à celle de PILOTE), le modèle NIWASAVE nécessite les données de vent tri-horaires (intensité-direction), et que l'on se donne une orientation de la parcelle permettant de caractériser le sens de déplacement du canon. Les caractéristiques du système (ϕ buse, pression, largeur de bande, vitesse) et les conditions de fonctionnement (dimension de parcelle, orientation, direction et vitesses du vent) permettent d'estimer la distribution spatiale de la dose d'irrigation. Cette distribution a fait l'objet de validations (Montero, et al, 2001 ; Augier, 1996 ; Richards et Weatherhead, 1993).

Les résultats de l'application au cas des sols profonds dans une région sujette à des conditions ventées (Mistral) comme la Drôme fait état de faibles risques de lessivage d'azote durant le cycle de culture alors que des quantités d'azote lessivées durant la période hivernale s'avèrent parfois élevées notamment sur les placettes ayant bénéficié des apports les plus faibles. Des apports d'eau insuffisants ne permettent pas à la plante de bien se développer. Il en résulte alors un reliquat d'azote plus important constituant une source de pollution des nappes à la faveur des pluies d'automne et d'hiver.

Sur le cas des sols superficiels de Charente le calendrier des irrigations a été déduit de la simulation au moyen de GESCAN en intégrant les règles de l'agriculteur représentatif de la région. Après avoir vérifié que selon le scénario de référence (celui de l'agriculteur) on retrouvait bien la dose totale apportée et le rendement obtenu, un certain nombre de stratégies liées à l'usage de l'appareil (irrigation de jour ou de nuit, espacement des bandes) et aux combinaison doses d'eau et d'azote ont été analysées. De tous les scénarios testés, celui qui réduit de façon significative les risques en environnementaux consiste à diminuer les doses d'azote. Celui ayant trait au sens de fonctionnement du canon par rapport à la direction du vent dominant (Atlantique), ou le fait d'irriguer la nuit ou le jour sont tous deux sans effets majeurs sur le rendement et les risques de lessivage d'azote. Comme attendu, l'incidence de l'espacement des passages de l'enrouleur est quant à lui notable. Sur les 11 années simulées le coefficient d'uniformité

de Christiansen a une valeur moyenne de 86%, ce qui est une valeur acceptable d'autant qu'à l'échelle de l'année il oscille entre 83 et 88%.

Selon la pratique de l'agriculteur, le lessivage d'azote sous irrigation est en moyenne de l'ordre 20 kg/ha avec cependant une assez forte variabilité inter-annuelle. Ce sont les années humides où les valeurs de lessivage sont importantes en raison de la stratégie d'irrigation de l'agriculteur. Le caractère superficiel de ces sols accroît fortement les risques de drainage lorsque arrive une pluie juste après irrigation. Le drainage durant l'inter-saison est élevé ce qui entraîne un certain taux de lessivage d'azote durant cette même période. Il est en moyenne comparable à celui durant le cycle cultural mais beaucoup moins variables. Ces valeurs sont significatives comparées à celles obtenus sur sols profonds. Des effets bien plus significatifs sur le drainage et le risque de lessivage sont obtenus en réduisant le niveau des doses d'eau et de fertilisants. Une réduction de 20% des doses de fertilisant réellement appliquées a un effet très bénéfique sur l'environnement sans réduire de façon très conséquente le rendement du maïs.

L'identification de pratiques d'irrigation respectueuses de l'environnement au moyen de l'outil modélisation acquiert d'autant plus de crédibilité qu'elle a été précédée d'expérimentations menées dans les conditions spécifiques du contexte où l'outil est appliqué. Force est de reconnaître que les éléments de validation dans les cas des sols superficiels de Charente sont quelque peu limités puisque portant uniquement sur le rendement et la dose apportée. Des études complémentaires afin de bien caractériser la spécificité propre des sols superficiels de Charente vis à vis de la problématique du transfert d'azote sous culture de maïs irrigué nous semble nécessaire.

Analyse des risques environnementaux résultant d'une pratique d'irrigation gravitaire : Le cas de l'irrigation à la raie:

L'étude ARTEMIS (Acquisition de Références Technico Economiques sur le Matériel d'Irrigation de Surface), DDA et al., 1989) et son actualisation (Platon et Mailhol, 1998), a permis à la faveur d'enquêtes et d'expérimentations effectuées chez une douzaine d'agriculteurs d'étudier leurs pratiques d'irrigation gravitaire traditionnelle et modernisée (usage des systèmes modernes de distribution de l'eau en tête de parcelles). Dans le cas du gravitaire, on rencontre des situations très contrastées en matière de pratiques. Ces situations résultent du type de culture (aversion plus ou moins forte à l'excès d'eau) et du type de sols. Dans le Sud-Est où se localise le gravitaire, on pourra négliger le rôle joué par les pluies étant donné leur rareté durant le cycle. Nous proposons de donner ici quelques chiffres sur l'exemple de la culture du maïs irrigué à la raie. Cette culture ne manifeste pas d'aversion à l'excès d'eau contrairement à certaines cultures légumières comme la carotte. Cet état de fait conduit généralement l'agriculteur à ne pas pratiquer les colatures. Cela signifie que toute l'eau délivrée à la parcelle est vouée à l'infiltration, celle non retenue dans le réservoir racinaire constituant le flux de percolation profonde. Sur sols argilo-limoneux à bonne réserve utile ($R_u \cong 150 \text{ mm/m}$) développant des fentes de retrait (région de Tarascon) l'apport sur la campagne d'irrigation est de l'ordre de 600 mm et ce en 6 arrosages. En présence de colatures les tests expérimentaux attestent d'une efficacité moyenne (ou rendement hydraulique net) n'atteignant pas 50%, en raison des pertes élevées par ruissellement en colatures (33%), la dose moyenne infiltrée est de 70 mm, l'uniformité de l'infiltration est de l'ordre de 80%. La pratique sans colature rendue possible en raison d'une pente faible fait passer l'efficacité moyenne sur la campagne au delà des 75%. Sur le même type de culture maïs en sols limoneux battant (parcelles situées en bordure de Durance), un régime d'infiltration beaucoup plus faible condamne les agriculteurs à irriguer avec des débits très faibles (0.2 à 0.35 L/s pour des raies supérieures à 200 m) et de façon beaucoup plus fréquente afin d'éviter un dessèchement trop prononcé pouvant être préjudiciable à l'infiltration. Dans ces conditions la fréquence d'irrigation est souvent décadaire voire hebdomadaire. A ce rythme là on peut compter jusqu'à 10 à 12 irrigations par saison, soient des volumes apportés pouvant atteindre et dépasser les 800 mm. Selon la pratique avec colatures on atteint des efficacités moyennes de 60% soient 10% de pertes en colatures et 20% en percolation profonde. Sur les 12 agriculteurs enquêtés 5 seulement pratiquaient des colatures bien aménagées. La pratique en raies bouchées donne lieu à des efficacités nettement supérieures ($R_n \cong 70$

%) notamment pour les agriculteurs (ils sont très rares en France) pratiquant l'irrigation à 2 débits ($R_n \cong 75$ à 80%). Les rendements obtenus en maïs sont souvent élevés, de 120 à 140 qx/ha (Tron et al, 1987). Les aspects liés à l'azote n'ont pas été analysés dans le cadre de ces enquêtes mais on sait l'apport d'azote se fait en deux applications, une avant semis l'autre avant traçage des raies. Nous traiterons ultérieurement des conséquences de cette pratique de fertilisation sur les risques environnementaux.

Avec le travail de Nemeth, (2001) nous disposons d'informations concernant les pratiques d'irrigation à la raie sur le périmètre irrigué d'El Carrizio au Mexique. Les parcelles pour la plupart bénéficient de la technique de planage au laser et disposent dans les cas les plus défavorables de siphons tubulaires pour alimenter les raies depuis un canal quaternaire. Comme aux USA les raies peuvent être de longueur supérieures à 600 m et l'arrosage d'un poste de 60 à 80 raies (les mains d'eau étant souvent de 80 l/s) peut durer plus d'une quinzaine d'heures. Compte tenu des fréquences d'apport (en moyenne tous les 15 jours) les doses minimales infiltrées atteignent et dépassent les 100 mm. Seul ce système d'irrigation permet en peu de temps (moins de 20 h) d'irriguer des superficies aussi importantes (de l'ordre de 7 ha) et ce, au moindre coût.

Une pratique de fertilisation courante dans ce pays consiste à utiliser de l'azote sous forme ammoniacale incorporée à l'eau d'irrigation souvent complétée par un apport d'urée le long de la ligne de culture en début de cycle. La figure 10 ci après montre l'impact à la fois des doses d'eau sur les rendements en maïs. Bien qu'il faille analyser avec prudence ces résultats (l'accessibilité aux doses d'eau étant parfois sujette à caution), il apparaît à l'évidence difficile d'établir une quelconque relation eau-rendement. Cet état de fait conduit à s'interroger quant à l'efficacité des pratiques d'irrigation ou l'existence de causes autres que l'eau et qu'il convient d'identifier. Dégradation et appauvrissement des sols sont à l'origine des tentatives récentes de passage à la technique du semis direct en irrigation à la raie sur laquelle une équipe du CIRAD travaille.

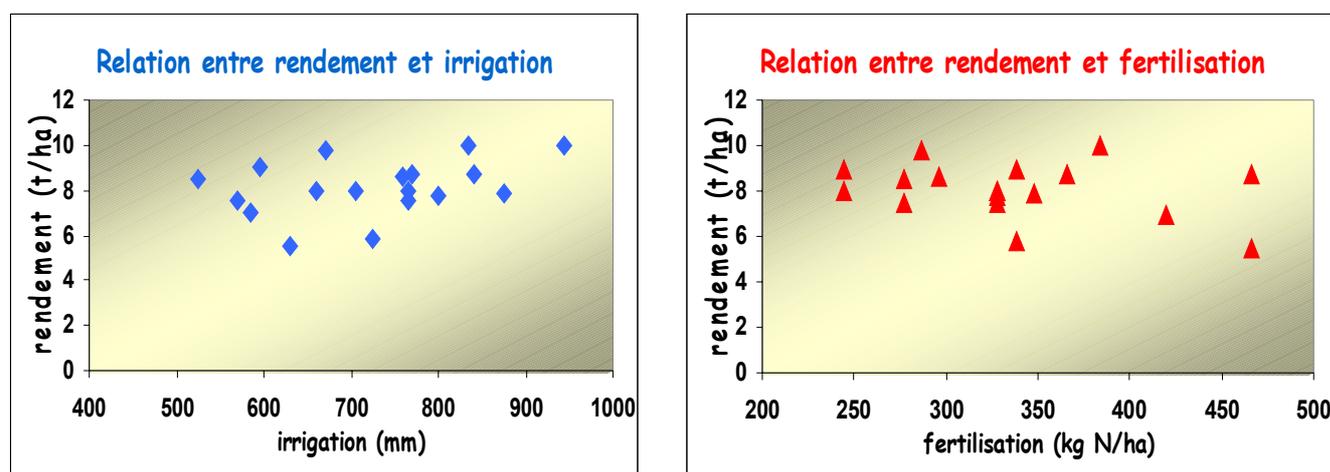


Figure 10 Exemple de résultats d'enquêtes sur un périmètre irrigué au Mexique : relation eau-rendement et fertilisation-rendement (d'après I. Nemeth, 2001).

Au Maghreb, en dehors de parcelles d'essai ou de périmètres récemment implantés faisant l'objet de suivis de la part des offices de mise en valeur (ORMVA), au Maroc, la raie longue n'est pas pratiquée pour les raisons déjà évoquées liées à l'absence de moyens de planage efficaces des

parcelles. Pourtant les essais d'irrigation sur raies longues (250 m) effectués sur la parcelle expérimentale de l'office de mise en valeur de la plaine du Gharb près de Kenitra au Maroc se sont avérés très performants en matière d'efficacité de l'irrigation sur canne à sucre. De bons niveaux de production ont été atteints, largement supérieurs à ceux obtenus sur les parcelles conduites en aspersion sur le même site expérimental. Les travaux menés sur ce site expérimental dans le cadre de la collaboration ORMVAG Cemagref financés par la caisse française de développement (CFD) traitaient également de la problématique du drainage.

Les essais conduits à Lavalette en 1999 et 2001 sur une parcelle de maïs voisine de 1.5 ha avec des raies de 130 m de longueur avaient pour objectif de traiter à la fois de la problématique eau-azote en irrigation à la raie. Ces essais ont permis de montrer que moyennant des apports d'eau et d'azote comparables à ceux délivrés sur le traitement ETM de l'aspersion, il était possible d'atteindre des niveaux de rendement très voisins. La publication de ces résultats (Mailhol et al., 2001) est du reste à l'origine de la prise de contact qu'ont effectuée des collègues d'un institut d'agronomie la région de Gérone (Espagne) avec notre équipe. Cet institut est actuellement confronté à une problématique de pollution de la nappe phréatique par les nitrates en raison de doses excessives d'eau et d'engrais qu'appliquent les agriculteurs irriguant à la raie.

De nombreuses situations étudiées montrent clairement que si disposer d'une parcelle planée selon la technique du laser rotatif et dotée d'un matériel performant assurant une bonne uniformité de distribution de l'eau en tête de parcelle (rampe à vanettes, gaine souple, siphons, ..) constituent les conditions nécessaires à la mise en œuvre de pratiques d'irrigation efficaces, elles sont cependant loin d'être suffisantes.

La modélisation, dans une certaine mesure, peut contribuer à améliorer l'efficacité dans un contexte d'irrigation à la raie modernisée. De même, en dépit de doses d'irrigation élevées, une technique de fertilisation adaptée, n'est pas toujours synonyme de lessivage d'azote durant le cycle de culture. C'est ce que nous nous proposons d'explicitier dans une approche de la modélisation des processus avancement-infiltration à l'échelle de la parcelle et de la saison culturale.

SOFIP : Une modèle opérationnel pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation à la raie sur les risques de percolation profonde et le rendement à l'échelle de la parcelle :

La simulation de l'impact d'une pratique d'irrigation et de fertilisation à l'échelle de la parcelle et de la saison est actuellement possible dans le cas de l'aspersion au canon enrouleur au moyen des outils précédemment présentés que sont GESCAN, adapté à l'estimation de la demande en eau, et NIWASAVE à celle du lessivage d'azote et du rendement. Dans ces approches, la dose délivrée au niveau d'une placette élémentaire de quelques m² peut être considérée indépendante des conditions du sol et dans ce cas s'infiltrer dans sa totalité (les intensités de pluie étant généralement inférieures à la capacité d'infiltration). Il n'en est pas de même en irrigation gravitaire où d'une part la source d'alimentation se trouve être en tête de parcelle et d'autre part les processus d'avancement de l'eau et d'infiltration sont intimement liés. Autrement dit, la répartition au sein de la parcelle de la dose brute connue, introduite en amont de la parcelle, nécessite la mise en œuvre d'un modèle tenant compte des conditions d'infiltration durant l'irrigation. Étant donné que l'on ambitionne de simuler le processus avancement – infiltration à l'échelle de N raies ($N > 30$), selon différents types de conduites d'arrosage possible (système avec ou sans colatures, ...), et ce à l'échelle de la saison de culture, il convient de se doter du modèle d'irrigation pouvant être un bon compromis entre simplicité et robustesse. Ce modèle d'irrigation, il faudra l'alimenter en paramètres au début de chaque arrosage. Nous devons pour cela disposer d'un générateur de paramètres. Enfin, pour pouvoir rendre compte des effets de l'irrigation à la fois sur le rendement et les pertes par drainage il nous faudra disposer d'un modèle de culture. Ce dernier, simulera comme dans l'approche NIWASAVE, le bilan hydrique et le rendement au niveau de chaque placettes élémentaires, et fournira en début d'irrigation les conditions initiales d'humidité du sol au générateur de paramètres. En raison de son caractère opérationnel, le modèle PILOTE précédemment présenté peut être un des modèles retenus. Nous verrons ultérieurement que ce choix se justifie eu égard à la spécificité du transfert d'azote.

Cet ensemble de modules enchaînés est représenté à la figure 11 ci après. Nous abordons dans un premier temps la problématique de l'efficacité de l'eau puis dans un deuxième temps nous

traiterons de celle de l'azote. L'approche de modélisation désigné SOFIP (Simulation Of Furrow Irrigation Practices) repose en grande partie sur la modélisation couplée du phénomène avancement-infiltration. Nous proposons brièvement d'évoquer les origines du modèle RAIEOPT permettant de simuler ce phénomène à l'échelle d'une raie lors d'une irrigation.

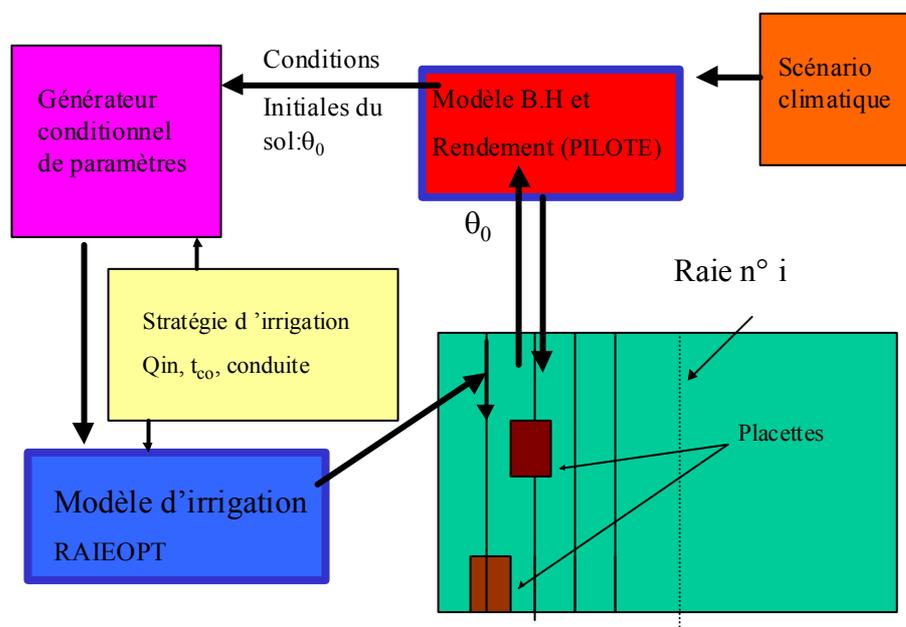


Figure 11 : Représentation schématique du modèle SOFIP

La modélisation en irrigation à la raie

La modélisation du phénomène couplé avancement-infiltration en irrigation à la raie a fait l'objet de nombreux développements pour la plus part menés aux USA. On trouve deux types d'approches, l'approche de type hydrodynamique et l'approche de type hydrologique basée sur le principe fondamental de conservation de la masse. L'approche hydrodynamique met l'accent au niveau des écoulements de surface. Les équations de St Venant plus ou moins complètes y sont largement utilisées. Cela va de la plus simple : l'onde cinématique, l'équation complète en passant par l'équation de l'onde de crue diffusante (ou zéro inertie) ou l'on néglige les termes d'inertie (fait justifié par la plupart des chercheurs) et de quantité de mouvement pour ne garder que l'équation de la ligne d'eau en régime variable. Ce modèle de St Venant communément désigné zéro inertie s'avère être le meilleur compromis, car contrairement à l'onde cinématique, il est utilisable sur pentes très faibles ou nulle et notamment en condition d'écoulement particuliers comme la raie bouchée. Là où le bas blesse, c'est que cet effort de modélisation, qui a du reste alimenté pendant pas mal d'années avec certes des variantes la littérature scientifique sur ce sujet, semble occulter le fait souterrain. Le but n'est il pourtant pas d'apporter l'eau à la plante et si possible par infiltration ? En effet le modèle souterrain ou selon un terme mieux approprié la loi d'infiltration est la loi de Kostiaikov – Lewis : $I = K\tau^a + c\tau$, dans laquelle I représente l'infiltration cumulée en L/m fonction du temps d'infiltration τ (ou temps d'opportunité) K , a , c des paramètres empiriques. Ce type de modèle est largement représenté de nos jours par le modèle SIRMOD de Walker (1993) dans lequel les paramètres autres que ceux relatifs à l'infiltration sont les paramètres caractérisant la géométrie de la section de raie (supposée

constante dans le sens amont-aval), le coefficient de rugosité n avec évidemment pour paramètres supposés connus la pente S_0 , la longueur de la raie FL le débit d'entrée Q_{in} et le temps d'irrigation t_{co} . Le modèle SIRMOD propose une correction des paramètres de l'infiltration dans le rapport des périmètres mouillés lorsque toutes choses égales par ailleurs on se propose de tester une valeur différente du débit ayant permis l'identification de la loi d'infiltration.

L'expérience montre que l'on a intérêt à identifier cette loi par calage à la fois sur l'avancement et les débits de colatures contrôlés au moyen d'un seuil jaugeur (Mailhol, 1996 ; Mailhol et al, 1997b), plutôt que de procéder à un calage à partir d'un essai d'infiltration loin d'être souvent représentatif et délicat à réaliser (Mailhol et al., 1988). Ce calage sur l'avancement et les sorties en colatures, est cependant délicat à réaliser et requiert une certaine expérience surtout si l'on rajoute un peu de complexité en cherchant aussi à caler le paramètre n qui est un paramètre de sensibilité beaucoup moindre que ceux de l'infiltration. Ce dernier, en l'absence de critère de calage objectif autre que celui réalisé par application de la formule de Maning-Strikler nécessitant que l'on mesure le tirant d'eau en section amont contrôlée, peut être fixé aux ordres de grandeur proposés par la littérature pour les canaux en terre ($n = 0.04$). La justification du choix d'une valeur de $n = 0.05$ pour la première irrigation et de 0.04 pour les suivantes est discutée dans Mailhol et Gonzalez, (1993). Selon cette hypothèse là, une méthode de calage numérique basée sur la minimisation de l'écart quadratique moyen entre volume infiltré calculé et volume infiltré "mesuré" déduit de l'équation de conservation de la masse donne une première approximation du jeu de paramètres K , a , c de la loi de K-L (Mailhol, et al, 1997) que l'on peut éventuellement affiner si nécessaire avec le modèle SIRMOD lui même.

Tabuada (1995) est un des rares chercheurs qui à notre connaissance se soit essayé au couplage d'une solution de St Venant avec une solution 2D de l'infiltration mieux adapté à la géométrie de la raie en l'occurrence la solution de Richards. Tout récemment, Wöhling (PhD en cours) a développé un modèle couplant une solution analytique de l'onde de crue diffusante (Schmitz et Seus, 1992) avec le code numérique Hydrus-2D. Cependant, les temps de calculs et les problèmes numériques considérablement plus élevés que dans l'approche précédente, sont une des raisons majeure justifiant le faible intérêt dévolu à cette approche, laquelle en outre requiert un nombre conséquents de paramètres et n'est pas applicable que sur un éventail de sol relativement limité. Une application de ce modèle sur les sols argilo-limoneux de la plaine de Tarascon a donné lieu à des résultats aberrants (temps d'avancement simulés 10 fois plus faibles que ceux observés).

Quelques rares solutions analytiques ou semi-analytiques de l'infiltration 2D existent. Celle proposée par Berthomé (1991) est la plus rigoureuse concernant les conditions imposées par la géométrie du domaine. Elle est cependant trop proche d'une solution numérique, le temps de calcul requis pour simuler quelques heures d'infiltration dans une section de raies demeurant encore trop prohibitif pour qu'elle puisse être couplée à un modèle de surface. La solution de Shmitz (1993), revue et corrigée par Wöhling et al., (2004), bien que s'appuyant sur des hypothèses plus fortes que celle de Berthomé donne néanmoins des résultats très satisfaisants en ce qui concerne l'infiltration cumulée au regard des comparaisons effectuées au moyen du code numérique HYDRUS-2D (Simunek, et al, 1999) présenté à l'annexe 2. Elle repose sur l'intégration d'une série d'infiltrations analytiques 1D à base physique (solution d'Haverkamp-Parlange, 1990) corrigée par un coefficient de forme sous la dépendance des effets capillaires tels que la formule Philip (1984) pour le cas des cavités. Dans l'article récent on y discute du poids des hypothèses à la base de ce modèle comme le caractère radial des flux, le fait de ne pas tenir compte d'un plan de flux nul au droit même de la ligne de culture ou encore l'importance de l'hypothèse visant à considérer un profil initial homogène ou non. Cependant le front d'humidité dont l'estimation repose sur les hypothèses simplistes des solutions analytique 1D est significativement éloigné de celui proposé par le code de référence numérique quant à son allure. Des travaux menés dans le cadre d'une thèse visant à tenter d'adapter le modèle au transfert de soluté devraient permettre d'améliorer l'allure de ce front d'humidité. Le couplage à une solution de St Venant est en cours dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Dresde. Mais il est à craindre que les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre et les temps de calculs ne soient encore trop conséquents pour l'avantage escompté. En outre, il convient de reconnaître que l'applicabilité des modèles fondés sur l'approche de Richards est assez limitée en irrigation gravitaire en raison de la présence d'effets macro-pores devenant significatifs même pour des sols à faible teneur en argile ($\cong 20\%$). En outre l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques au cours de la saison d'irrigation due à la déstructuration du sol résultant du traçage des raies est difficilement prédictible.

Cela nous conduit à identifier un jeu de paramètres spécifique au premier arrosage (Mailhol et al, 2004c). On montre cependant que le sol retrouve quasiment sa structure dès le deuxième arrosage tant sur sols argileux (Mailhol et al., 1999) argilo-limoneux (Mailhol et al., 2004d) que sur sols limoneux (Mailhol, 2003).

L'approche hydrologique :

Le modèle RAIEOPT appartient à cette classe de modèles fondés sur le principe fondamental de conservation de la masse. Les phénomènes d'inertie et de quantité de mouvement sont totalement négligés dans cette approche. L'importance de ces phénomènes liées au débit et au système d'alimentation des raies, s'atténue rapidement dans le sens amont aval, pour devenir négligeables. On a pu en outre observer expérimentalement que la ligne d'eau est quasiment parallèle au fond de la raie 30 à 50 cm à peine en amont du front (Girousse J.C. 1987). L'équation sur laquelle se fondent ces modèles a été proposée par Lewis et Milne (1938) pour le cas de la planche et étendue au cas de la raie.

$$Q_{in} t = \sigma A_0 x(t) + \int_0^x I(t-t_s) ds \quad (1)$$

Dans cette équation, $Q_{in} t$ est le volume entrant en litres, $\sigma A_0 x(t)$ le volume stocké en surface à l'instant t et $I(t-t_s) ds$ le volume d'infiltration par unité de longueur fonction de la position s et du temps d'opportunité $t-t_s$ où t_s est le temps pour atteindre s , $x(t)$ étant la position du front à l'instant t . Dans le cas d'une raie alimentant à son extrémité aval un fossé de colatures, il faut ajouter à cette équation le volume perdu en colatures lorsqu'on entame la phase d'entretien.

Différentes formulations sont proposées dans la littérature concernant l'estimation du volume stocké. Elles ont fait l'objet d'une étude comparative au Cemagref (Girousse 1987) qui a montré que l'on pouvait retenir pour estimation du volume stocké l'expression: $\sigma A_0 x(t)$ où A_0 (en $m^2 \times 1000$) est la section mouillée en tête et σ un coefficient de forme de la ligne d'eau voisin de 0.8. Une solution pour l'avancement s'obtient alors par résolution analytique de l'équation (1) pour une fonctionnelle de l'infiltration choisie. Inversement une solution pour l'infiltration peut être obtenue lorsqu'on se donne une fonctionnelle de l'avancement. Infiltration et avancement se trouvent donc être intimement liés par l'équation de base (1). Cette façon de procéder aboutit à une solution exacte de l'avancement contrairement à la méthode d'Elliot et Walker (1982) qui en sur-conditionnant le problème en imposant à la fois l'équation de K-L pour l'infiltration et une loi de type puissance pour l'avancement (l'équation (1) n'ayant pas de solution connue $x(t)$ pour K-L) ne proposent qu'une solution approchée aboutissant quelque fois à des valeurs aberrantes de l'exposant a de K-L.

Il est cependant préférable de se doter d'une fonctionnelle de l'infiltration, surtout lorsque celle-ci repose sur des concepts physiques comme dans le cas de la planche (Rendon, 1987), ou découle d'observations de terrain (Mailhol 1992a ; Mailhol et Gonzalez 1993). C'est cette solution choisie dans le cas du modèle RAIEOPT où la loi d'infiltration à caractère conceptuel est inspirée de l'approche type "réservoir". Elle a été initiée sur des sols à effet macro-pore manifeste comme les sols fissurés :

$$I(t) = B + Cs t \quad (2)$$

Où le front d'avancement de l'eau progresse le long de la raie après avoir rempli un réservoir de capacité B (l/m) sur l'unité d'espace. Le terme B peut également représenter une part plus ou importante (selon le niveau de qualité de travail du sol) du stock en surface piégé par le micro-relief et voué à l'infiltration. Le terme Cs (l/m/mn) représente quant à lui le régime de remplissage de la micro-porosité. Cette approche conceptuelle de l'infiltration cumulée induit pour solution exacte de l'équation (1) l'expression suivante pour l'avancement :

$$x(t) = \frac{Q}{C_s} \left(1 - \exp\left(-\frac{C_s}{B + \sigma A_0} t\right) \right) \quad (3)$$

, solution démontrée dans Mailhol, 1992 par une résolution classique de l'équation (1) et dans Mailhol et Gonzalez, (1993) au moyen de la transformée de Laplace. L'équation (3) présente les propriétés suivantes : $\frac{dx}{dt_{t=0}} = \frac{Q}{A_0 \sigma + B}$ et $x(t)_{t \rightarrow \infty} \rightarrow Lm = \frac{Q}{C_s}$ longueur maximale théorique atteinte par le front d'avancement.

L'équation (2) témoigne d'un remplissage quasi instantané de la macro porosité. On peut imaginer un remplissage plus lent en proposant une loi de type :

$$I = B(1 - \exp(-\rho t)) + C_s t \quad (4)$$

, qui n'est autre que la loi de Horton (1940) où le paramètre ρ permet de rendre compte de la rapidité de remplissage de cette macro porosité.

Le lien de ces deux précédentes loi d'infiltration à caractère conceptuel avec des solutions reposant sur des bases physiques est établi dans Mailhol (2003), article proposé l'annexe 3, en faisant largement référence aux travaux de Parlange et al. (1982). Ce lien nous a permis de proposer une approche à caractère prédictif ce qui n'est pas sans intérêt compte tenu de l'objectif que l'on s'est fixé. On montre donc que la structure de la loi de Horton se déduit de la loi de Talsma et Parlange lorsque $t \rightarrow \infty$:

$$I = K_s t + \frac{S^2}{2K_s} \left[1 - \exp\left(-\chi \frac{2K_s^2}{S^2} t\right) \right], \quad (5)$$

où χ est un paramètre d'ajustement. Le fait que dI/dt ait une valeur finie à $t = 0$ est en contradiction avec la théorie de l'infiltration en conditions de Dirichlet. Malgré ce point non conforme à la théorie, l'équation empirique de Horton déduite de conditions d'infiltration en fortes intensités de pluies, continue à être utilisée en hydrologie (Kutilek et Nielsen, 1994). On remarquera donc que l'équation linéaire (2) est une solution asymptotique de (9) avec $B = S^2/2K_s$ et C_s assimilé à K_s . Et qui devient :

$$I = S^2/2K_s + K_s t \quad (6)$$

Cela nous conduit à envisager une approche plus générique de RAIEOPT en optant pour le choix d'une loi de Horton comme fonctionnelle de l'infiltration avec la contrainte d'un paramètre supplémentaire ρ traduisant le caractère plus ou moins rapide du remplissage de la macro-porosité. La solution de (1) par la méthode des transformées de Laplace donne alors pour équation de l'avancement :

$$x(t) = A_1(1 - e^{\alpha_1 t}) + B_1(1 - e^{\alpha_2 t}) \quad (7)$$

où,

$$A_1 = \frac{Q}{\alpha_2 - \alpha_1} \left[\frac{1}{C} + \frac{\alpha_2}{c} \right] ; B_1 = \frac{Q}{\alpha_1 - \alpha_2} \left\{ \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\alpha_1}{C} \right\} \quad (8)$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{(c + b\rho + C\rho)}{2C} \pm \frac{[(c + b\rho + C\rho)^2 - 4cC\rho]^{0.5}}{2C}$$

Bien que mieux adaptée au cas des sols fissurés où elle trouve en quelque sorte une justification ‘‘physique’’, on a pu montrer (Mailhol, 1992a) que la loi linéaire (2) pouvait être étendue à un grand nombre de sols pour lesquels B résume la phase transitoire de l’infiltration, le terme B selon la loi de Parlange étant l’ordonnée à l’origine de l’infiltration cumulée quand t tend vers l’infini. Il convient aussi d’ajouter que le calage de la loi de Horton sur l’avancement donne lieu à des valeurs de ρ supérieures à 0.1 mn^{-1} pour la plus part des sols. Des valeurs inférieures à 0.1 mn^{-1} peuvent néanmoins être obtenues sur des sols contenant des argiles non gonflantes à effets macro-pore faibles ou inexistantes et sur lesquels l’atteinte du régime permanent de l’infiltration peut être longue contrairement aux sols argileux gonflants qui développent des fentes de retrait. Aussi obtient-on des résultats fort comparables entre le modèle basé sur la loi de Horton et celui basé sur la loi linéaire pour une majorité de sols (Mailhol, et al., 1997b ; Mailhol, 1996) l’éventuelle différence au niveau de l’avancement se faisant essentiellement sur les premières abscisses (ou aux temps courts).

Les lois d’infiltration précédentes ont été développées pour estimer l’infiltration cumulée verticale moyennant certaines hypothèses plus ou moins fortes (profil initial d’humidité homogène par exemple). Les utiliser dans un contexte d’infiltration bidimensionnelle comme celui de la raie confère à ces lois un certain degré d’empirisme. Il est fort probable que l’usage de paramètres déduits de la mesure (il y en a hélas peu en hydrodynamique du milieu poreux non saturé) pour simuler l’avancement et l’infiltration à partir du couplage avec un modèle de type St Venant (par exemple) conduise à de mauvais résultats. Il peut en être tout à fait autrement en procédant au calage des paramètres de façon indirecte, c’est à dire en utilisant le modèle couplé lui même. Cette façon de procéder permet d’obtenir un jeu de paramètres adapté au contexte bidimensionnel de la raie concernant le processus d’infiltration. Le degré d’éloignement des valeurs ainsi obtenues vis à vis de celles représentative du type de sol peut être un indicateur du niveau d’empirisme ou d’inadéquation de la modélisation adoptée.

Quel que soit le degré d’empirisme de ces lois adaptées au contexte 2D, celles ci ne permettent d’estimer que la dose infiltrée à une abscisse x sans préjuger de sa répartition dans le sol. Couplées au modèle de surface elles permettent en outre d’estimer le temps d’opportunité (temps d’infiltration) à une abscisse donnée. Dans un objectif de couplage du modèle d’irrigation à un modèle de culture on a, d’un point de vue expérimental, pu montrer que l’on pouvait faire abstraction de la façon dont pouvait se répartir l’eau dans la couche de sol allouée au système racinaire. Ce constat a été établi au moyen de batteries de tensiomètres pour analyser les flux (Nemeth, 2001) complétés par des profil d’humidité à la sonde à neutron effectués sous la raie ainsi que sous la ligne de culture et ce pour différentes durées après irrigation (Mailhol, 2001). La justification du couplage entre modèle simplifié d’irrigation et modèle de culture est reprise dans Mailhol et al, (2004d).

Compléments aux solutions pour l’avancement

Le temps de récession au point d’abscisse x, $t_r(x)$ doit être pris en compte pour obtenir la valeur du temps de présence de l’eau (temps d’opportunité) $\tau(x) = t_{co} - t(x) + t_r(x)$ et calculer l’infiltration cumulée en un point donné de la raie. Le volume infiltré peut alors être calculé selon l’expression:

$$V \text{ inf} = \int_0^L I(t_{co} - t(x) + t_r(x)) dx \quad (9)$$

,où t_{co} est le temps de coupure de l'eau (ou durée d'irrigation) et $t(x)$ le temps d'avancement obtenu par inversion de l'équation d'avancement, L la longueur de la raie. Le temps de récession $t_r(x)$ est ici défini comme la différence de temps entre la fin du ruissellement au point d'abscisse x et la coupure de l'eau. La récession est difficile à mesurer avec précision en raison des nombreuses flaques vouées à l'infiltration. Une estimation peut être donnée au moyen de l'équation ci-après (Mailhol 1992):

$$t_r(x) = \left[\frac{x}{60\sqrt{S_0} C_s^{0.667}} \right]^{0.6} \quad (10)$$

,où C_s est l'infiltration stabilisée et S_0 la pente moyenne (en m/m). Elle repose sur l'hypothèse d'un régime quasi uniforme concernant l'écoulement surface et permanent pour ce qui est de l'infiltration. Le volume perdu en colatures peut alors être estimé par:

$$V_c = V_a - V_{inf} \quad (11)$$

, où V_a , le volume apporté = $Q_{in}.t_{co}$. Ces modèles analytiques, de conception hydrologique, permettent de prédire les performances de l'arrosage relatif à la raie ayant fait l'objet d'un suivi d'avancement. La performance d'un arrosage est caractérisée par les critères suivant exprimés en %:

$R_{hn} = D_n/D_a$; E_a , définie précédemment; $C_u = D_n/D_m$; $P_c = V_c/V_a$, où R_{hn} est le rendement hydraulique net souvent désigné 'efficacité hydraulique',

Option de type temps réel :

Cette option du modèle RAIEOPT avait pour objectif d'améliorer le choix des paramètres de l'irrigation (Q_{in} , t_{co}) à partir du suivi en temps réel de l'avancement du front sur une ou quelques raies supposées représentatives de la parcelle. Le débit adopté par l'agriculteur devait être mesuré à l'aide de seuils jaugeurs installés à l'entrée des raies faisant l'objet du suivi. Les paramètres, en l'occurrence ceux relatifs à l'infiltration étaient obtenus par méthode classiquement désignée méthode inverse à savoir par calage du modèle à partir de quelques couples abscisses-temps. De nombreux tests réalisés dans des conditions de sol et de longueurs de raies différentes attestent d'une bonne aptitude du modèle à prédire le temps d'avancement et les pertes par ruissellement en colatures lorsque l'on procède au calage sur la demi longueur de raie seulement. En outre la solution dite "optimale" à savoir celle qui satisfait à la fois le critère d'uniformité (CU) limite et de rendement hydraulique a été validée expérimentalement (Mailhol, 1992). La méthode de calage initiée dans l'article précédemment cité est largement discutée dans Mailhol et al., (1997a) et comparée à d'autres méthodes. Pour résumer, la méthode de calage sur l'avancement utilise l'algorithme d'optimisation de Rosenbrock (1962) qui consiste à rechercher le meilleur jeu de paramètres minimisant l'écart quadratique moyen entre l'avancement observé et simulé. La recherche des paramètres se fait entre des bornes pré-définies, les plus déterminantes sur le succès du calage étant celles proposées pour les paramètres du régime d'infiltration stabilisé. La recherche de ce paramètre entre $0.5K_s$ et $2K_s$, K_s étant l'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique du sol considéré, donne lieu à des résultats très satisfaisants. Cette façon de procéder valide le fait de caler un jeu de paramètres sur une durée de calage beaucoup plus courte que la durée d'extrapolation, les temps d'avancement étant souvent très inférieurs aux temps d'irrigation.

Dans cet article de 1997, l'approche hydrodynamique et l'approche hydrologiques sont également comparées sur un exemple d'arrosage type et sur 4 exemples contrastés dans Mailhol (1996). L'avancement, le profil d'infiltration et les pertes en colatures sont à peu de choses près identiques et des tests de comparaison sur l'effet de la pente S_0 , montrent une sensibilité très comparable entre les deux approches. Cela a en soi rien de bien surprenant dès lors que les deux approches respectent le principe dominant qui est la conservation de la masse et l'une comme l'autre abordent l'infiltration à l'échelle de la raie selon une approche globale. La différence est quelque fois plus marquée au niveau

du profil d'infiltration (sens amont-aval) due au fait que certains modèles hydrodynamiques proposent une correction de l'infiltration en fonction du périmètre mouillé de la forme $\left[\frac{P_{mx}}{P_{ma}}\right]^b$ où P_{ma} et P_{mx} sont respectivement le périmètre mouillé amont correspondant au débit d'entrée et P_{mx} celui à l'abscisse x et b un paramètre empirique souvent pris à 1 (Smerdon, 1985) mais plus proche de 0.5 (en moyenne pour les sol couramment irrigués à la raie) comme le montrent expérimentalement Oyonarte et al (2002) en accord avec les simulations que l'on peut également faire au moyen du code HYDRUS-2D (Mailhol, 2001 ; Mailhol et al, 2004c) pour tester la force de certaines hypothèses d'un modèle simplifié et dont on fait état en annexe 2. Compte tenu des gammes de débits utilisées en irrigation à la raie, des valeurs de b voisines de 0.5 ne permettent guère de justifier l'intérêt de prendre en considération ce type de correction.

Des options complémentaires ont été développées comme la possibilité de simuler la conduite à deux débits (Mailhol, 1992b) ou la conduite en raie bouchée (Mailhol et al, 1997a), présentée dans un des articles proposés à l'annexe 3, ou encore l'irrigation d'une raie à tronçons hétérogènes comme dans l'exemple de la canne à sucre sur le Gharb (Mailhol et al, 1999).

Option prédictive du modèle RAIOPT:

Les équations (5) ou (6) ont été mises à profit pour proposer une approche prédictive du modèle RAIEOPT décrite et justifiée dans Mailhol (2003).

En introduisant la variable intégrale (Gardner 1958) appelée transformée de Kirchoff ou potentiel de flux

$$\phi(h) = \int_{h_i}^h K(h) dh, \quad h \geq h_i \quad (12)$$

on fait apparaître la longueur capillaire λ_c qui selon la relation de Gardner :

$$K(h) = K_s \exp(\alpha \cdot h) \quad (13)$$

est égale à $1/\alpha$. Le paramètre λ_c représente l'importance relative entre la capillarité et la gravité et que sa valeur peut varier de quelques cm pour des matériaux grossiers jusqu'à 100 cm pour les matériaux fins (in Kulikek et Nielsen, 1994, chap. 5). Cette grandeur macroscopique correspondant à la hauteur de la frange capillaire "moyenne", référence faite à (12) peut être aussi donnée par :

$$\lambda_c = \phi_s / K_s \quad (14)$$

soit :

$$\lambda_c = \beta S^2 / K_s (\theta_s - \theta_i) \quad (15)$$

en remplaçant selon White et Sully, (1987) ϕ_s par $\beta S^2 / (\theta_s - \theta_i)$, la sorptivité S étant la pente de la relation $I = f(t^{1/2})$ déduite de l'infiltration cumulée sur les temps courts. Compris entre $1/2$ (Modèle Green et Ampt, 1911) et $\pi/4$ (cas du sol linéaire : hypothèse de diffusivité capillaire D constante), ce paramètre β peut être pris égal à 0.55 selon White et Sully (1987) pour le sol en place. La mesure de la sorptivité est un moyen d'estimer le paramètre λ_c au moyen de (14) ou hf (potentiel matriciel au voisinage du front d'humectation) selon l'approche de Green et Ampt sous l'hypothèse forte du sol delta, (Philip 1973):

$$S^2 = 2K_s (\theta_s - \theta_i) (h_0 - h_f) \quad (16)$$

L'existence de ces relations confèrent aux équations (2) et (3) un caractère prédictif dès lors que l'on est à même de connaître la variation de teneur en eau du sol $\Delta\theta$ et les paramètres caractéristiques du sol K_s et λ_c . A noter que la valeur 0.9 se substitue à 1 dans l'estimation de la sorptivité au moyen de la formulation de Green et Ampt.

$$I(\tau) = 0.9\lambda_c \Delta\theta (1 - \exp(-\chi K_s (\lambda_c \Delta\theta)^{-1} \tau)) + K_s \tau \quad (17)$$

Il convenait toutefois de montrer que les paramètres λ_c et K_s impliqués dans cette modélisation simplifiée avaient un quelconque rapport avec des caractéristiques du sol considéré. Si tel était le cas, on pouvait alors considérer que le caractère prédictif de l'approche proposée était en quelque sorte validé. Ce fut un des objectifs de l'article Mailhol (2003) où l'intérêt de travailler à l'échelle d'un ensemble de N raies ($N > 30$) est largement démontré en raison des différentes sources de variabilité émanant du débit d'entrée et des caractéristiques de l'infiltration. En effet la méthode de calage inverse des paramètres à partir de l'avancement permet d'obtenir moyennes et écarts types des paramètres à l'échelle de la raie d'irrigation. Il s'avère que ces valeurs moyennes sont tout à fait en accord avec les celles caractérisant le sol considéré d'après White et Sully (1987), ainsi qu'avec celle déduites à l'échelle locale à partir des techniques reposant sur l'infiltromètre à disque (Perroux, et al., 1988) sur la même parcelle (Revol, 1994) ou au moyen d'un double anneau de Muntz (K_s essentiellement). Au préalable l'hypothèse qu'un déficit le déficit de saturation moyen, mesuré au niveau du site neutronique disposé au centre de la parcelle, pouvait être affecté à l'ensemble des N raies avait été formulée. On peut à ce stade on peut rappeler que sur le cas des vertisols du Gharb, on avait montré (Mailhol et al, 1999) que le paramètre B de RAIEOPT était bien corrélé au niveau d'épuisement de réserve en eau du sol obtenu par bilan hydrique. On retrouve des valeurs de λ_c et K_s également conformes au type de sol sur le cas de la parcelle de maïs à Tarascon étudiée dans l'article Mailhol et al, (2004e) présenté en annexe. Si, le fait qu'une bonne adéquation existe entre valeur moyenne de λ_c déduite des conditions d'infiltration axisymétrique avec celle déduite par méthode inverse à partir de la raie paraît peu surprenant compte tenu du caractère 2D de cette dernière, cela paraît plus difficile à expliquer concernant la comparaison avec une valeur de K_s déduite d'un essai à l'anneau de Muntz. Est-ce dû à l'échelle d'identification (la raie) qui masquerait certains phénomènes ou à la faiblesse des tirants d'eau (souvent inférieurs à 5 cm) qui, combiné aux formes des raies, donnent peu d'expression au caractère 2D de l'infiltration en phase d'avancement ?

La valeur du paramètre empirique χ permet d'effectuer la transition entre sol à effet macro pore élevé (cas des sols lourds du Gharb par exemple) et sol à effet macro-pore faible (sols limoneux de Lavalette) sans qu'il soit nécessaire de changer de modèle. Le fait de proposer une valeur élevée de χ ($\chi = 40$ par exemple) rend compte du remplissage rapide de la macro-fissuration en sol argileux. L'infiltration prend ainsi rapidement l'allure d'une loi linéaire, expression asymptotique de la loi de Horton. Hormis les sols argileux macro fissurés une valeur de χ de l'ordre de 10 peut être généralement adoptée pour une large gamme de sols à effet macro-pore faiblement prononcés. Des valeurs voisines de l'unité peuvent être proposées pour des sols à effet macro-pore négligeables voire nuls où prédomine la diffusion. Le paramètre χ par son aptitude à réguler le caractère transitoire de l'infiltration offre une grande souplesse à la loi d'infiltration proposée sans en altérer significativement le caractère prédictif.

L'approche analytique simple telle que celle proposée dans le modèle RAIEOPT donne lieu à des résultats quasi identiques à ceux de SIRMOD concernant la simulation du profil amont-aval de la dose infiltrée. Cette comparaison met en évidence la nécessité de faire porter davantage l'effort sur l'aspect souterrain du problème que sur l'aspect superficiel (e.g l'écoulement de surface) lequel a pendant un certain nombre d'années fourni matière à publication à l'école américaine. Afin de réaliser cette comparaison la loi de Kostiaikov-Lewis (K-L) utilisée dans SIRMOD est pour cela ajustée sur la

loi d'infiltration utilisée dans RAIEOPT. Les deux premiers exemples sont relatifs à la pratique d'irrigation avec colature et portent sur des expérimentations effectuées en Provence.

Exemple 1 : Parcelle à Cadenet sur parcelle (limono-sableux) de carottes (d'après P. Berthomé, 1987) :

$$L = 136 \text{ m}, Q_{in} = 0.35 \text{ l/s}, t_{co} = 240'$$

$$S_0 = 0.8\% \quad P_c (\text{obs}) = 34\%$$

L'ajustement de K-L sur la loi d'infiltration de RAIEOPT est présenté à la figure 12. La figure 13 fait état d'une parfaite simulation (avec un sensible bonus pour RAIEOPT) de l'avancement par les 2 modèles. La figure 14 montre enfin un profil d'infiltration très similaire obtenu par les 2 modèles avec une parfaite simulation du pourcentage de pertes en colatures par les 2 modèle ($P_c = 34\%$).

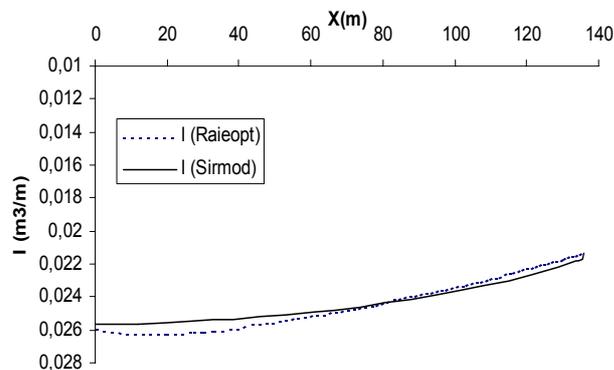
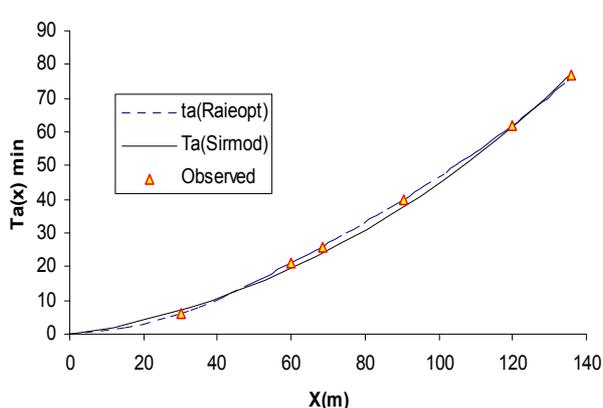
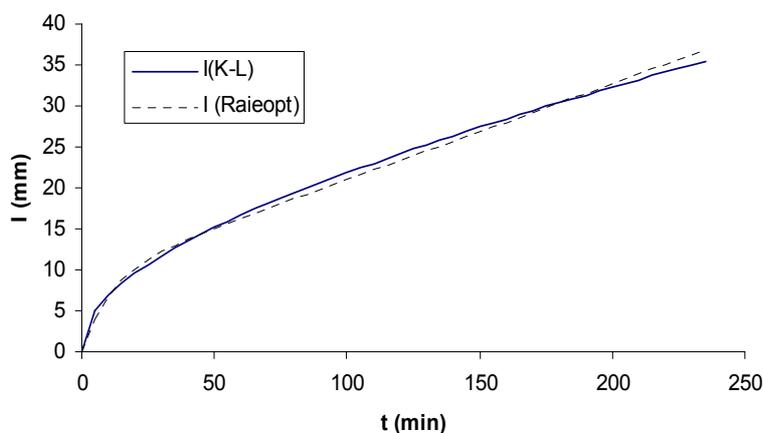


Fig.13 Comparaison des avancements

Fig.14. Simulation de la dose infiltrée 0-L

Exemple :2 : Parcelle à Tarascon (1989) (Argilo-limoneux)

$$L = 260 \text{ m}; S_0 = 0.06\%$$

$$Q_{in} = 0.87 \text{ l/s}; t_{co} = 420'$$

$$P_c (\text{obs}) = 45\%$$

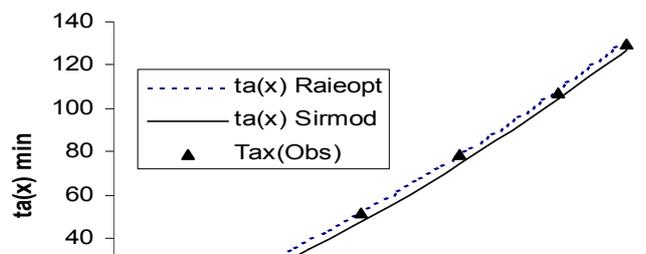
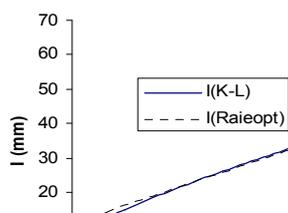


Fig. 15 Ajustement de K-L

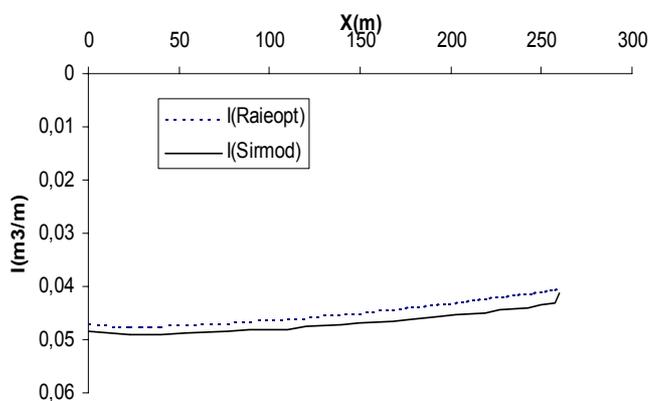


Fig.17 Profil d'infiltration amont aval

On constate que sur ce deuxième exemple, aux conditions de sol et d'essai très particulières, la comparaison des simulation des 2 modèles est là encore très soutenable.

L'exemple suivante est relatif à la pratique en raie bouchée mise en œuvre dans le cadre des expérimentations de 1999 à Lavalette (Cemagref Montpellier)

Cas de la raie bouchée :
 Parcelle de Lavalette 1999
 $L = 130 \text{ m}$ $S_0 = 0.25\%$
 $Q_{in} = 0.77 \text{ l/s}$ $t_{co} = 120'$

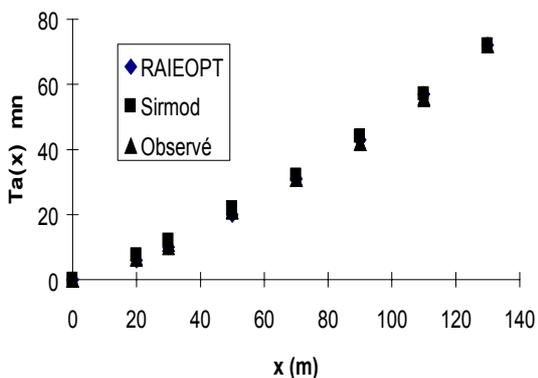


Fig. 16 Comparaison des avancements

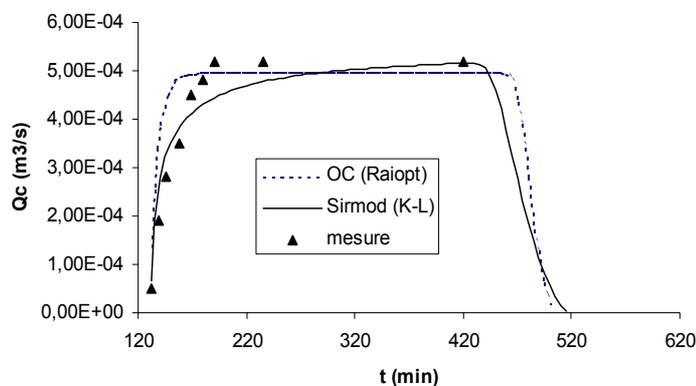


Fig.18. Colatures selon SIRMOD et l'onde cinématique couplée à la loi de RAIEOPT

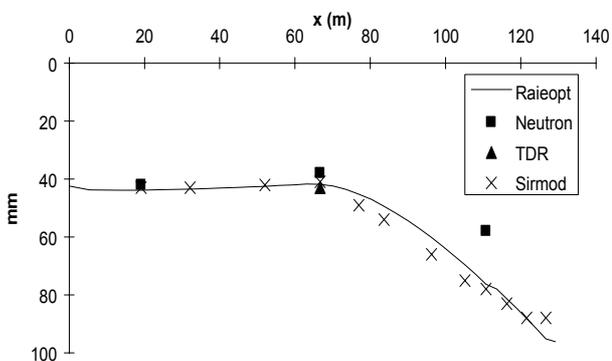


Fig 19. Comparaison des avancements

Fig. 20 Profil amont-aval de la dose infiltrée

Là encore et cette fois dans le cas de la pratique en raie bouchée, comparaisons et validations sont très acceptables.

Le générateur de paramètres

Dans le cas de l'aspersion, on peut avec plus ou moins d'exactitude simuler l'apport réel au niveau d'une placette à partir des caractéristiques connues du système et de ses conditions de fonctionnement. Dans le cas d'une parcelle irriguée à la raie, nous venons de voir que l'estimation de la dose au niveau d'une placette ne peut se faire abstraction faite des caractéristiques qui régissent l'infiltration. Nous avons vu qu'il était possible de les déterminer par méthode inverse au moyen d'un suivi de l'avancement. Un bon critère de calage ($R^2 > 0.95$) obtenu dans les hypothèses de fonctionnement requises ($Q_{in} = cte$) nous permettent d'assigner les paramètres ainsi obtenus à l'ensemble de la raie considérée. L'ensemble des N couples de paramètres (λ_c , K_s) associés aux valeurs des débits d'entrée Q_{in} mesurés au niveau de chaque raies permettrait à l'aide du modèle de simuler la dose infiltrée au niveau de chaque placettes pour une durée d'arrosage t_{co} donnée. La dose allouée à une placette située à une distance x de l'amont, centrée sur la ligne de culture, de longueur l_x et de largeur E_c (espacement des raies), est calculée sur la base de la moyenne des doses infiltrées dans les raies adjacentes au niveau de l'abscisse x . Dans le cas de la pratique en raies bouchées sur vertisols dans le Gharb, on avait mis en évidence un accroissement manifeste de la vitesse d'avancement du front à partir d'une distance correspondant au début de l'endiguement. La sur dose occasionnée par l'endiguement génèrait des conditions d'infiltration hétérogènes (fissures moins ouvertes qu'en amont de parcelle) que le modèle analytique RAIEOPT permet de simuler. La solution utilisée dans le cadre des articles Mailhol et al. (1999) et Mailhol (2003) et obtenue par résolution de l'équation (1) par le méthode classique des transformées de Laplace est présentée dans Mailhol (2001). Sous l'hypothèse de conditions d'infiltration homogène dans le sens amont-aval, la variabilité simulée de l'infiltration résulte en conséquence de la variabilité longitudinale due à la différence des temps d'opportunité $\tau(x)$ et de la variabilité transversale due au triplets (λ_c , K_s , Q_{in}).

Lorsque l'on s'inscrit dans une démarche prédictive, on ne connaît à priori bien évidemment pas les jeux de paramètres et leur combinaison propre à réaliser une simulation susceptible de refléter la réalité. On est dans ce cas conduit à procéder par simulation de nature stochastique ce qui limite notre l'objectif à l'estimation des risques de drainage locaux excessifs induits par une pratique d'irrigation dans un contexte de sol donné. Il convient cependant de donner à cette démarche stochastique des règles conformes à l'observation des phénomènes. Ces règles établies dans des contextes expérimentaux contrastés sont à la base de ce générateur de paramètres. Elles sont en cohérence avec l'approche fondée sur l'identification des paramètres à partir du processus d'avancement. C'est sur ces bases qu'ont été analysées les différentes sources d'hétérogénéités.

Les dispositifs expérimentaux dans le Gharb, ont permis d'analyser l'impact respectifs des sources de variabilité émanant du débit ($20 > Cv(Q_{in}) > 5\%$:selon les systèmes de distribution en tête) et du sol (état de surface, niveau d'humidité) sur l'avancement. Par exemple, une corrélation hautement significative entre les N débits Q_{in} mesurés à l'entrée de chaque raies et les temps d'avancement $T_a(x)$ à une abscisse x donnée obtenue pour des valeurs de $Cv(Q_{in})$ de l'ordre de 10% témoigne de conditions d'hétérogénéités de sols relativement faibles. Au contraire, une corrélation faible ou inexistante témoigne dans le cas de $Cv(Q_{in})$ élevés de conditions de sols très hétérogènes. On montre également qu'à conditions d'entrées comparables un niveau d'humidité plus élevé améliore significativement la corrélation et qu'un seuil de $Cv(Q_{in})$ en dessous duquel ou au dessus duquel une source de variabilité masque l'autre peut être identifié. Ceci n'est pas sans conséquence sur le soins à apporter au réglage des systèmes de distribution dans une contexte de variabilité des conditions de sol données.

Un phénomène important eu égard à notre objectif a également été identifié. C'est celui relatif à l'auto-corrélation de l'avancement inter arrosages. D'un arrosage à l'autre les raies rapides demeurent rapides et vis et versa. Bien entendu ce phénomène peut être masqué par la variabilité des débits lorsque celle ci dépasse un certain seuil. Le caractère singulier résulte généralement des opérations de travail du sol et de l'effet de tassement due aux roues de tracteur. Il est dans bien des cas très visible surtout lors de la première irrigation où les raies paires (ou impaires) avancent beaucoup plus vite que les raies impaires. Tel est le cas sur l'exemple de la parcelle de Tarascon en 1989 (Mailhol et Gonzalez, 1993) alors que sur la parcelle de Lavalette en 1999 on observe pas une telle configuration (Mailhol, 2003).

Les paramètres λ_c et K_s peuvent être respectivement ajustés par une loi normale et log-normale. Les valeurs moyennes que l'on peut proposer sont celles du sol en place, c'est à dire après que celui ci ait recouvert sa structure. Les calages obtenus sur des types de sols contrastés nous permettent d'accéder aux valeurs de ces paramètres qu'il convient d'adopter pour la simulation du premier arrosage. Celles ci sont de l'ordre de deux fois celles obtenues pour les arrosages suivants. Des mesures de densité sèche avant et après le premier arrosage permettent, moyennant l'usage de certaines formulations pedo-transfert, d'adapter la valeur de K_s au degré de tassement du sol (Mailhol et al, 2001, Mailhol, 2003). Mais il convient de se montrer prudent dans l'usage de ces formulations surtout lorsqu'elles n'ont pu être réajustées au contexte de sol considéré. Quant aux valeurs des débits alimentant les différentes raies, ils suivent également une distribution normale de moyenne Q_{in} . Le coefficient de variation du débit dépend à la fois du système de distribution (la rampe à vanettes étant théoriquement le plus performant en matière d'homogénéité de distribution) et du soin accordé à son installation aux réglages des ouvertures (cas de la gaine souple ou de la rampe à vanettes) ou encore au degré de propreté de l'eau (présence d'algues par exemple). Dans le Gharb on a pu dans certains cas obtenir de très bonnes uniformités ($Cv(Q_{in}) \cong 5\%$) avec un système aussi fruste que le siphon tubulaire dans le cas d'un canal quaternaire parfaitement entretenu.

L'approche de type Monte Carlo est utilisée comme outil générateur du paramètre B dans la mise en œuvre d'un outil pour simuler l'avancement sur un ensemble de N raies sur le cas des vertisols du Gharb (Mailhol et al. , 1999). Le paramètre C_s de (2) était fixé à sa valeur moyenne eu égard à sa faible sensibilité sur l'avancement comparativement à B sur ce type de sol. La prise en compte du caractère hétérogène de l'avancement induit par la pratique de la raie bouchée était réalisé en considérant un tirage aléatoire d'une deuxième valeur de B assignée au tronçon aval et ce, de façon conditionnelle (prise en compte de la corrélation B_1, B_2). Une relation avait en outre été établie entre l'écart type de B et le paramètre lui même. L'allure de la relation semblait signifier que la variabilité de l'avancement était d'autant plus élevée que le sol était sec (B élevé en raison de l'importance de la macro fissuration) et ce, jusqu'à un certain seuil au delà duquel la variabilité avait tendance à décroître. La simulation sur un arrosage hors calage à partir d'une valeur moyenne de B prédite au moyen de la relation avec un niveau d'épuisement de la réserve en eau du sol permet de simuler de façon très satisfaisante les caractéristiques moyennes de l'avancement ainsi que sa variabilité.

L'approche type Monte Carlo est à nouveau utilisée dans ce nouveau générateur de paramètre qu'il a cependant fallu adapter afin de rendre compte des phénomènes observés dans d'autres contexte. Celui de Lavalette ou de Tarascon où la variabilité des débits d'entrée était plus faible ont permis la mise en évidence de ces phénomènes émanant des conditions de sol. Ces phénomènes sont relatifs à l'auto-corrélation de l'avancement inter-arrosages, l'éventuel effet tassement d'une raie sur deux par les roues du tracteur. Enfin il convient de tenir compte de la tendance affichée par le graphe de corrélation λ_c, K_s afin d'éviter d'appareiller des doublets susceptibles d'induire des avancement peu réalistes, trop rapides dans le cas de tirages aléatoires associant un couple de faibles valeurs ou trop lentes dans le cas contraire. Lorsque l'on souhaite rendre compte de l'impact du tassement, on procède au tirage dans une loi de distribution bimodale. Les paramètres alloués aux raies paires, s'agissant par exemple des raies compactées, seront tirés lors du premier arrosage dans la loi de distribution qui leur est propre. Il en sera de même pour les paramètres alimentant les raie impaires.

La méthode retenue pour rendre compte de l'auto-corrélation de l'avancement inter-arrosages consiste à mémoriser la hiérarchie du tirage des paramètres de l'infiltration effectué lors du premier arrosage. Les paramètres tirés lors de ce premier arrosage (et lors des suivants) font l'objet d'un classement. Par exemple supposons que la raie n° 4 ait été classée comme étant la plus rapide lors du premier arrosage, la plus faible valeur du jeu de paramètres tiré lors de l'arrosage suivant

(correspondant à la raie la plus raide de cet arrosage) sera assignée à la raie n° 4. De façon similaire, le jeu de paramètres de la raie classée seconde au regard du jeu de paramètres tiré est assigné à la raie classée seconde lors du premier arrosage au regard du jeu de paramètres, et ainsi de suite.

Concernant le respect de la tendance de la relation $\lambda_c K_s$, on rejette dans un premier temps tout tirage du paramètre hors des limites $m_p \pm 2.25 \sigma_p$ (m_p , σ_p moyenne et écart type du paramètre). Puis dans un deuxième temps, on ne retient une valeur de K_s , après tirage d'une éventuelle valeur de λ_c supérieure à $m_{\lambda_c} + 1.25\sigma_{\lambda_c}$ que si elle est inférieure à $m_{K_s} + 1.25\sigma_{K_s}$. On procède de même pour le cas symétrique permettant d'éviter le couplage de valeurs faibles (changement de signe : $-1.25\sigma_p$).

La prise en compte d'un niveau de variabilité concernant les paramètres impliqués dans le processus avancement-infiltration permet, à l'échelle d'un ensemble de raies, de dégager des stratégies d'irrigation et des conduites d'arrosage plus réalistes que celles déduites en procédant au niveau d'une ou de quelques raies et à l'échelle d'un événement comme on avait coutume de le faire. Dans un contexte de variabilité faible à moyenne de l'avancement ($Cv(TL) < 15\%$) le modèle permet de montrer que la pratique de la raie bouchée sur des parcelles de longueur inférieures à 300 m améliore l'efficacité hydraulique et agronomique par rapport à la raie avec colatures. Les drainages locaux occasionnés par les endiguements aval demeurent acceptables et il n'est pas nécessaire d'augmenter les temps d'entretien ($t_{co} - TL$) pour compenser les hétérogénéités d'apport en aval de parcelle. Les applications du modèle SOFIP sont nombreuses outre le dimensionnement et la gestion des systèmes d'irrigation dans un contexte pedo-climatique. Nous proposons ci après un exemple d'application mettant en relief la possibilité offerte par le modèle de gérer les sources de variabilité dans un contexte de sol et de climat donné afin d'accroître la production tout en minimisant les risques de drainage locaux souvent synonymes de lessivage d'azote.

Des études pour appréhender la variabilité de l'infiltration en irrigation à la raie ont été menées essentiellement aux USA. Elle sont citées dans l'article traitant du modèle SOFIP à l'annexe 3. La plupart reposent sur des tests d'infiltration locaux long et fastidieux consistant à caler une loi de Kostiakov-Lewis. En raison de la difficulté à conduire ces essais il s'avère difficile d'estimer quelle part de variabilité est réellement imputable aux conditions de sol. Oyonarte et al., (2002) ont le mérite de montrer le faible impact d'une éventuelle variation du périmètre mouillé sur l'infiltration. Schwankel et al. (2000) quant à eux, mettent en évidence, au moyen de l'approche hydrodynamique basée sur une discrétisation fixe du pas d'espace dans une solution de S^t Venant, le fait que le débit et l'infiltration sont les sources majeures de variabilité. Popova et Kuncheva (1996) furent parmi les premiers à vouloir rendre compte de l'impact de la variabilité transversale de l'avancement sur les performances de l'irrigation, hypothèse forte assumée que toutes les raies reçoivent le même débit. Mais comme Lamaq et Wallender (1994) avec la loi de K-L on se limitait à l'évaluation a posteriori d'un arrosage. Dans le cadre d'un projet de collaboration en cours le modèle FURMOD de Popova et le modèle SOFIP ont fait l'objet d'une comparaison sur le cas de la parcelle de Tarascon. Les résultats très satisfaisants de cette comparaison figurent dans un article soumis à "Irrigation and Drainage Systems".

Dans le cadre de sa thèse effectuée à l'UR irrigation et dont le contexte expérimental était celui de la parcelle de Tarascon, Gonzalez (1991) proposait en se basant sur la théorie de la mise en facteur d'échelle une approche statistique permettant d'obtenir l'intervalle de confiance de la dose infiltrée à l'échelle d'un bloc de N raies lors d'un arrosage après calage de la loi d'infiltration linéaire. Les travaux cités, quoique centrés sur la problématique de la variabilité spatiale, se réfèrent à un événement particulier (un arrosage) et ne peuvent s'inscrire dans une logique de prédiction des risques de pertes d'eau par percolation profonde résultant d'une pratique d'irrigation comme le propose le modèle SOFIP. Nous proposons dans le paragraphe suivant un exemple d'application permettant d'illustrer ces propos.

Exemple d'application du modèle SOFIP au cas d'une parcelle à Tarascon en sol argilo-limoneux.

Nous proposons un exemple d'application du modèle SOFIP sur une parcelle de maïs à Tarascon en sol argilo-limoneux irriguée par le système rampe à vanettes. Seuls des résultats extraits

de l'article soumis à "Irrigation Science" consultable en annexe sont ici présentés. On pourra en outre y vérifier la bon respect de l'auto-corrélation inter arrosage sur le cas de Lavalette ainsi que des caractéristiques moyennes du rendement et sa variabilité On y détaille également le calage et la validation relatif à cet exemple. Pour résumer, le calage est effectué selon la méthode inverse précédemment décrite sur 30 raies d'un bloc arrosé lors de l'irrigation n° 3. Les valeurs moyennes des paramètres identifiés ($\lambda_c = 25 \text{ cm}$, $K_s = 0.7 \text{ cm/h}$) sont en accord avec celles proposées par la littérature pour ce type de sol et en accord avec les valeurs proposées par des formulation de type pedo-transfert. Le calage effectué lors de la première irrigation sur l'échantillon de raies non tassées propose bien des valeurs moyennes doubles de celles obtenues pour le troisième arrosage concernant λ_c et K_s . En ce qui concerne les raies tassées les valeurs de ces deux paramètres sont évidemment plus faibles que pour les raies non tassées mais de manière beaucoup plus marquée pour λ_c que pour K_s . Les figures 21 et 22 représentent en valeurs classées (pour permettre une possible comparaison) les temps d'avancement observés et simulés respectivement pour les arrosages n° 1 et n° 4. On peut constater que le modèle permet d'assez bien représenter la variabilité de l'avancement à l'échelle d'un bloc irrigué de 30 raies. On notera également au regard de la figure 23a un bon accord entre les temps d'avancement médians observés et simulés à $x = L$ (longueur de la parcelle) et à $x = L/2$ ainsi les coefficients de variation de l'avancement (Fig. 23b). Pour ce qui est de la validation des pertes en colature (ou du volume infiltré) elle est plus délicat à réaliser étant donné qu'un nombre limité de raies étaient équipées d'un seuil jaugeur en colatures. On a dû retenir pour procéder à ce type de validation sélectionner parmi les raies équipées, celles dont le temps d'avancement était le plus proche possible de celui de raie médiane simulée. Malgré cela, on peut considérer que les pertes en colatures des raies médianes sont dans l'ensemble correctement simulées au regard de la figure 24. La simulation de la stratégie adoptée par l'agriculteur sur le cas de la saison de 1989 est présentée au tableau 8 suivant. On peut y lire valeurs moyennes et coefficients de variation des paramètres simulés sur l'ensembles des 4 arrosages. Les percolations profondes ont essentiellement lieu lors du premier arrosage. Leur valeur moyenne augmenterait très significativement sans l'effet de tassement des raies. Coefficient de variation de la dose (équivalent 100- Cu de Christensen pour l'aspersion) est plutôt faible compte tenu des temps d'entretien et du caractère fissuré des sols propice à l'obtention de bonne uniformité. Le rendement simulé est inférieur d'un peu moins de 10% par rapport au rendement moyen réel. Il n'est pas trop élevé en dépit de la dose totale appliquée et des faibles pertes en colatures (hormis celles du premier arrosage elles sont inférieures à 10%). Un déclenchement des irrigation trop tardif pour des raisons liées à l'organisation du travail en est la raison. Le drainage obtenu résulte à la fois des pertes par percolations profondes lors du premier arrosage est des pluies en fin de cycle.

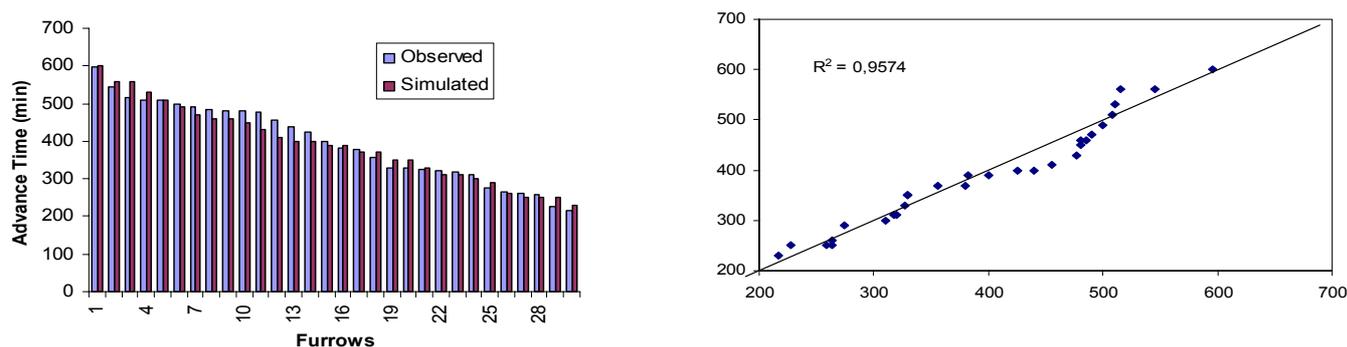


Figure 21. Temps d'avancement observés et simulés classés 1^{er} arrosage à Tarascon (1989)

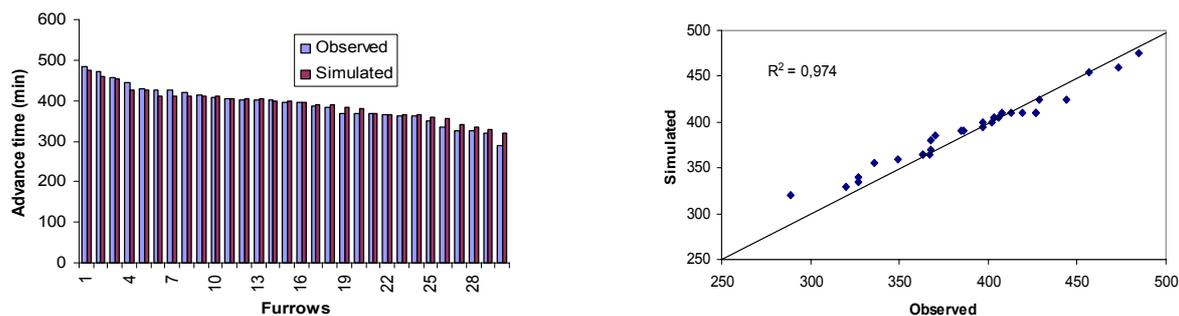


Figure 22. Temps d'avancement observés et simulés classés : 4^{ème} arrosage à Tarsacon (1989)

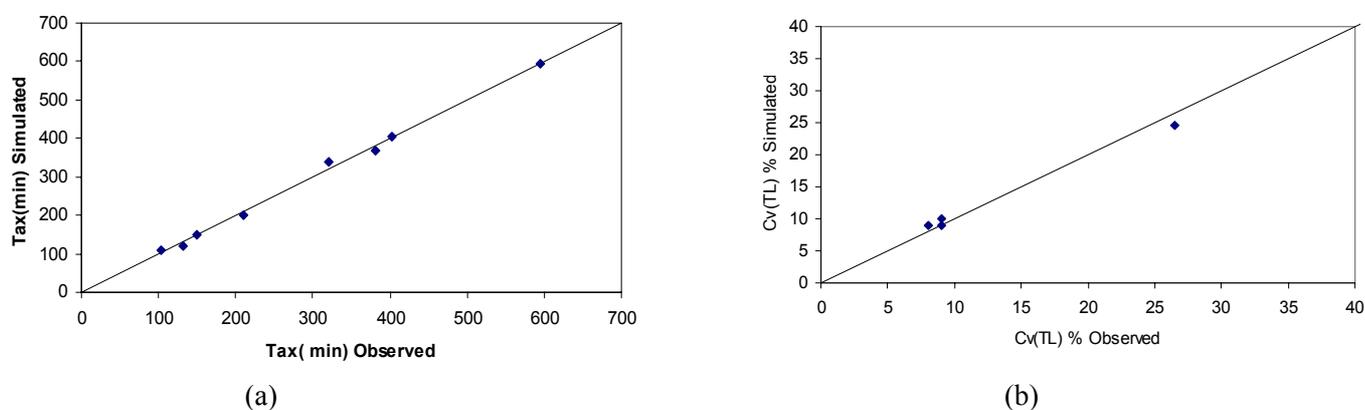


Figure 23 Temps d'avancement simulés/observés des raies médianes à $x = L/2$ et à $x = L$ (a) et coefficients de variations de l'avancement (b)

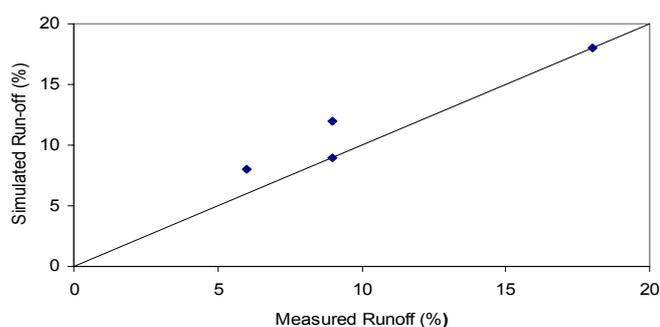


Figure 24 Pertes en colatures mesurées/simulées pour les raies médianes lors des 4 arrosages

Tableau 8. Simulation de la stratégie de l'agriculteur en 1989: 1^{ère} irrigation 3 Juillet Nombre d'arrosages = 4. (DTA = Dose totale appliquée, Pc = % de pertes en colatures, Pp = percolation profonde durant l'irrigation, Cv(Dose) = coef. de variation de la dose infiltrée, Drainage au cours du cycle de culture. Faible contexte de variabilité au delà du 1^{er} arrosage Cv(TL) \cong 9%. (Cv(TL) =26% pour le 1^{er} arrosage en raison du tassement une raie sur deux

Qin (L/s), t _{co} 'c	DTA (mm)	Pc, Cv (%)	Pp, Cv (%)	Cv(Dose) (%)	Drainage (mm)	Rendement T/ha
1.30, 550	503	14, (89)	35, (10) 1 ^{ère} irrig.	14	75, (31)	8.4, (8)
0.50, 725						
0.70, 474						
0.65, 450						

On se propose d'utiliser le modèle pour tester des stratégies améliorantes en supposant que l'on se trouve placé dans différents contextes de variabilité qui nous conduit à tester 4 options présentées ci après :

Option 1 : le temps d'irrigation t_{co} est supposé égal au temps d'avancement de la raie médiane et un contexte de faible variabilité pour l'avancement (Cv (TL) = 10%) est considéré (LV) (à l'exception du premier arrosage en raison du tassement une raie sur deux)

Option 2: se distingue de l'option 1 par un contexte de variabilité pour l'avancement élevé (HV), Cv (TL) \cong 20 %.

Option 3 : t_{co} est supérieur à T_{lmed} , i.e; t_{co} = 1.5 T_{lmed} , on suppose un faible Cv(TL), Cv (TL) = 10%)

Option 4 : identique concernant le temps de coupure de l'eau 3 mais avec Cv(TL)) \cong 20%.

On constate que pour atteindre un niveau de production comparable à celui obtenu dans un contexte à faible variabilité il convient d'apporter d'avantage d'eau, ce qui accroît très significativement les risques de drainage et diminue l'efficacité hydraulique et agronomique. Par rapport à la stratégie de l'agriculteur le fait d'utiliser une méthode de pilotage permet d'améliorer la production quelque soit le contexte de variabilité. C'est le résultat que l'on obtient en règle générale quelque soient les systèmes d'irrigation. Mais force est de constater que dans le cas du gravitaire l'agriculteur est souvent assujéti au tour d'eau (ce n'était pas le cas de l'agriculteur de Tarascon). Il est alors contraint d'irriguer à une fréquence fixe (option aussi proposée par le modèle) qui ne permet pas toujours des possibilités d'amélioration conséquentes du système.

Tableau 9. Simulation d'une stratégie améliorée pour le scénario climatique sec de 1989 selon 4 les options. L'arrosage est décidé quand la réserve hydrique est épuisée à 65%

Options and Nb. of Water applications = 6	TWA (mm)	Ro, Cv (%)	Dp, Cv (%)	Cv(WAD) (%)	Drainage (mm)	Yield T/ha
Option 1 t _{co} = TL ; LV	450	7, (111)	26, (30) 1 st irrig.	22	34, (64)	13.6, (16)

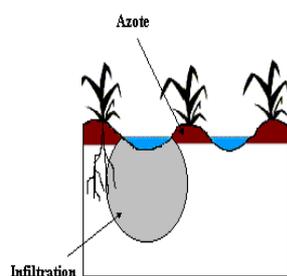
Option 2 $t_{co} = TL ; HV$	450	8, (205)	26, (39) irrig	1 st	25	35, (64)	12.2, (26)
Option 3 $t_{co} = 1.5TL ; LV$	570	19, (59)	41, (20) irrig	1 st	13	78, (29)	14.0, (5)
Option 4 $t_{co} = 1.5TL ; HV$	570	19, (81)	41, (24) 1 st irrig		14	82, (29)	13.8, (6)

La problématique de l'azote en irrigation à la raie

L'approche SOFIP si elle permet de mettre en évidence les risques de drainage excessifs résultant d'une pratique d'irrigation à la raie ne permet pas de dire ces derniers donnent lieu à du lessivage et de le quantifier. Cette inaptitude ne découle pas du choix du modèle de culture (il est vrai que PILOTE ne simule pas le transfert d'azote) mais de la nécessité de faire appel pour cela à une modélisation adaptée des processus de transfert aux conditions imposées par la géométrie du domaine et ce, en liaison avec la technique de fertilisation adoptée dans bon nombre de régions du monde et en particulier dans le SE de la France. Le choix d'un modèle de culture de type capacitif comme STICS pour tenter d'analyser l'impact d'une pratique de fertilisation sur le rendement et le lessivage d'azote s'est avéré en conséquence inadapté (Nemeth, 2001, Mailhol, et al., 2001).

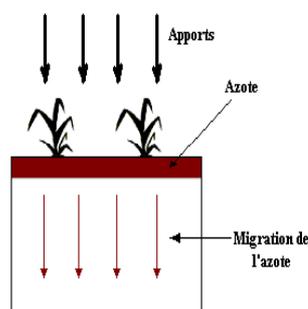
Cette technique de fertilisation consiste à appliquer l'engrais sous forme de granulés juste avant le traçage des raies. Lors de cette opération le soc déplace le fertilisant du centre de la raie pour le concentrer sur la partie haute de la ligne de culture communément appelée billon. La figure 25 ci après illustre la distribution de l'azote après l'opération de confection des raies et permet de comparer les conditions de transfert de l'azote en système d'aspersion et en système à la raie.

Transfert type 2D



Irrigation à la raie

Transfert type 1D



Irrigation par aspersion

Figure 25. La problématique du transfert d'azote en irrigation à la raie en liaison avec une technique de fertilisation

Cette distribution hétérogène du profil d'azote ne permet pas de procéder au bilan azoté comme on a pu le faire dans le cas de l'aspersion. Cette forte hétérogénéité entre le stock d'azote sous la raie et sous le billon demeure au delà de la récolte et ne peut s'estomper qu'à la faveur des premières pluies d'automne comme le montre les figures 25 extraite de l'article (Mailhol et al, 2001) contrairement au cas de l'aspersion (Fig. 26).

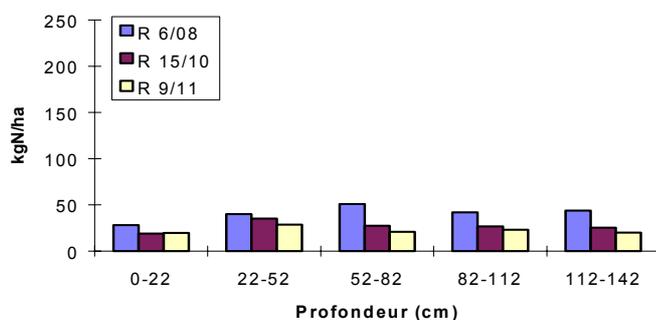


Figure 25a Evolution du profil d'azote sous la raie

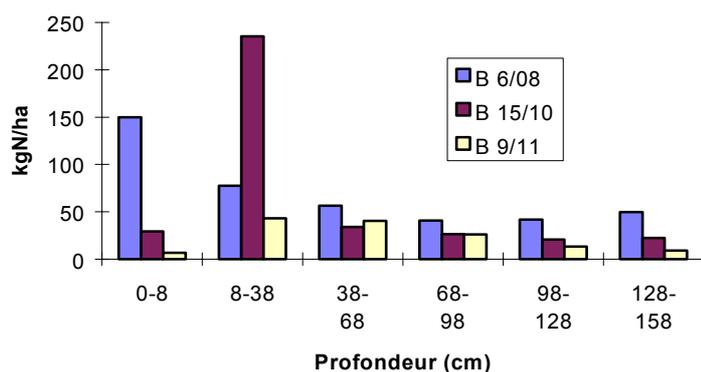


Figure 25b Evolution du profil d'azote sous le billon

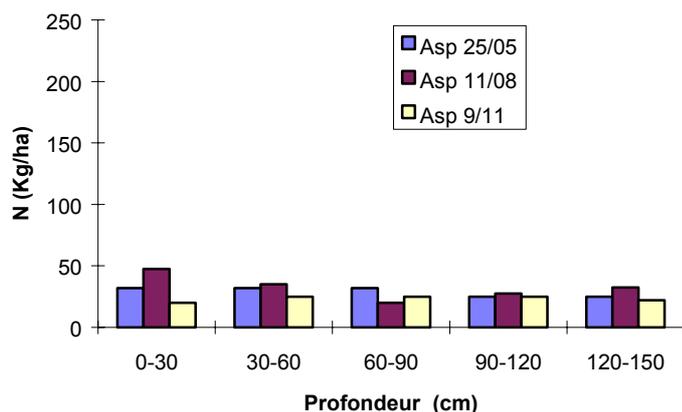


Figure 26 Evolution du profil d'azote en aspersion (Traitement ETM)

Le fait de concentrer le fertilisant sur la partie haute du billon le préserve des effets gravitaires de l'infiltration. En outre les effets capillaires susceptibles de faire migrer cet azote vers les couches sous-jacentes du sol peuvent s'avérer peu efficaces en raison de trop faibles tirant d'eau ou de temps d'irrigation insuffisants pour un type de sol donné. La simulation des transfert d'eau et d'azote au moyen du code numérique HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) appliquée au cas de la raie est présentée à l'annexe 2. Elle met bien en évidence ces phénomènes traités dans (Mailhol, 2001). Comme on pourra le constater, la différence des distributions d'azote dans le profil, sous infiltration à faible tirant d'eau, et à fort tirant d'eau (en zone aval des raies bouchées à Lavalette) est manifeste selon le modèle. L'absence de dispositifs de mesure, suffisamment en aval des raies, ne nous a pas permis en 1999 de valider les résultats des simulations concernant la distribution effective sous fort tirant d'eau. C'est ce qui a motivé les essais réalisés sur le même site en 2002, mais cette fois en infiltration statique dans le cadre d'un DEA (Triki, 2002). Comme le montre les figures 27a et 27b extraite de l'article (Mailhol et al, 2004) soumis à AGWAT, l'impact du tirant d'eau est conséquent. La distribution de l'azote semble toute fois assez cloisonnée comme le montre le profil effectué au droit de la raie. Un troisième prélèvement entre raie et billon aurait permis de mieux caractériser la distribution de l'azote dans le profil mais au risque de perturber très significativement le dispositif mis en place car l'objectif ne se limitait pas à un seul essai d'infiltration. Ce 3^{ème} prélèvement entre raie et billon effectué sur un site en 1999 avait permis de vérifier qu'une redistribution significative d'azote du billon vers la raie s'effectuait cependant.

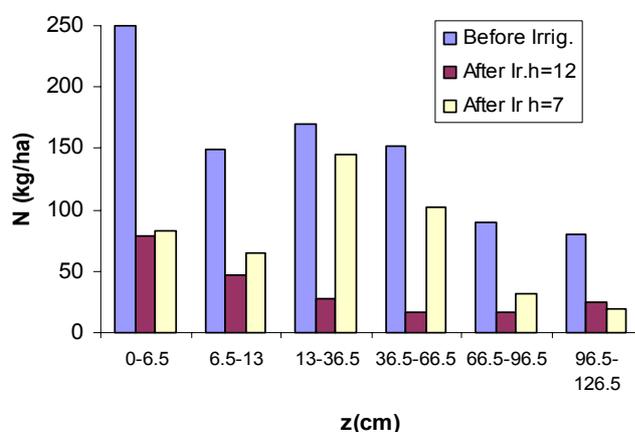


Figure 27a. Profil d'azote sous la ligne de culture (billon) 8 jours après une première irrigation sous tirant d'eau $h = 7$ cm et $h = 12$ cm

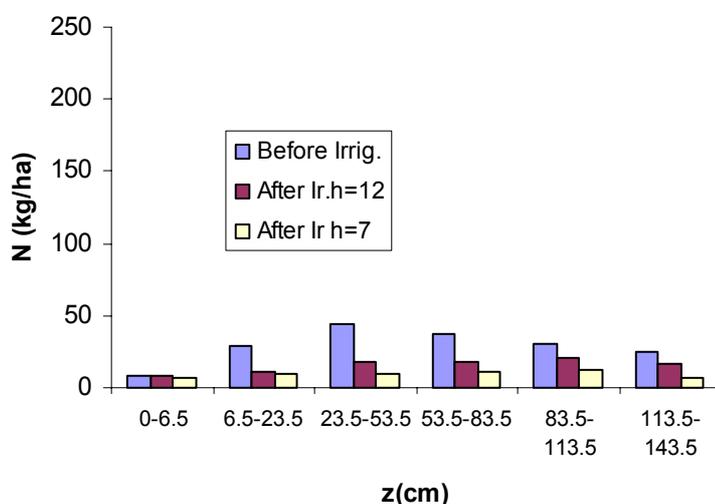


Figure 27b. Profil d'azote sous la raie 8 jours après une première irrigation sous tirant d'eau $h = 7$ cm et $h = 12$ cm

Au regard des deux figures et en dépit du fait que la plante ait pu consommer une dizaine de kg N/ha durant les 8 jours ayant précédé le prélèvement, il paraît difficile de dire que le lessivage est inexistant même s'il l'on admet une probable redistribution entre billon et raie.

Le modèle HYDRUS-2D permet toutefois de rendre assez bien compte de la redistribution de l'azote dans le profil lors de la première irrigation des deux sites sous condition de charge en surface différente (Fig.28). Les paramètres gouvernant le transfert d'eau sont (paramètres de la courbe de rétention de Van Guenuchten et K_s) ont été calés pour faire en sorte de simuler de façon acceptable à la fois l'infiltration cumulée et les profils d'humidité (TDR et tube de sonde sur les sites). Concernant les paramètres relatifs au transfert d'azote (D_L , D_T , et K_d) on a adopté les valeurs proposées dans Mailhol et (2001). Toutefois, et compte tenu du fait que tout le NH_4^+ n'avait pas encore été transformé en ions nitrate, on a dû procéder au transfert simultané des 2 ions en considérant les valeurs du coefficient d'échange isotherme K_d spécifiques aux 2 ions celle relative aux ions nitrates étant négligeable ($\cong 10^{-6}$ L/kg).

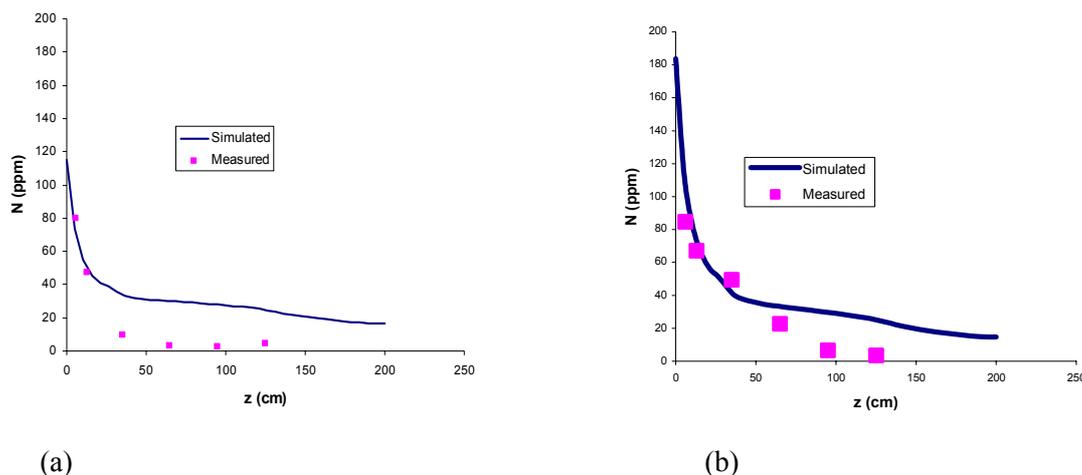


Figure 28 Transfert d'azote sous billon sous $h_0 = 12$ cm (a) et $h_0 = 7$ cm (b) lors du premier arrosage

Les stocks d'azote mesurés en fin de cycle de culture à la verticale de la raie et du billon ($0 < z < 1.40$ m) sont identiques dans le cas de l'essai sous tirant d'eau élevé et différent encore de 20 Kg/ha pour le site à plus faible tirant d'eau. Sur la base d'un profil homogène pour ce traitement en fin de cycle, les comparaisons avec le traitement en aspersion à l'ETM nous conduit par la technique du bilan azoté, à proposer comme estimation du lessivage au delà de la zone racinaire du maïs (1.4 m), durant les irrigations, une valeur de l'ordre de 25 kg/ha. Le modèle STICS propose une valeur guère plus élevée (une trentaine de kg/ha). Mais les tests du modèle sur Lavalette tendent à montrer qu'il sous estime le lessivage, le rendement simulé étant quant à lui proche des potentialité de la variété.

Une estimation du même ordre de grandeur que celle proposée par le bilan azotée (sensiblement plus faible) est obtenue à l'aide d'HYDRUS-2D en proposant les termes puits et sources de l'équation de diffusion convection en adéquation avec nos observations sur les sites conduits en aspersion (0N pour la minéralisation, et absorption de l'azote par la plante au cours du cycle). Les profils d'eau et d'azote en fin d'arrosage constituaient pour cela les entrées nécessaires à la simulation de la redistribution prenant en compte les condition de flux à la surface imposées par le climat de la période. Les valeurs constantes durant certaines périodes imposées à ces termes peuvent constituer des hypothèses certes discutables. Là encore la méthode du lysimètre apparaît d'une grande utilité pour l'estimation des flux d'azote sous culture irriguée à la raie. C'est du reste un des arguments parmi ceux retenus pour justifier la collaboration mise en place avec l'institut de science des sols de Sofia qui dispose de ce type d'appareil installé sur parcelle irriguée à la raie.

On ne peut à ce stade que ressentir le besoin de proposer une approche capable de nous éviter pareille "gymnastique". Un modèle dans le genre de STICS pour le cas de l'aspersion, mais adapté au cas des transferts 2D eau –azote telle que le justifie la technique de fertilisation adoptée, susciterait don un intérêt certain. Une contribution au développement d'un tel outil est proposée dans le cadre d'une thèse en cours. Dans une optique de déboucher à plus ou moins long terme sur une approche de type SOFIP mais cette fois intégrant l'aspect soluté, l'outil doit de ce fait s'éloigner autant que faire se peut des approches numériques afin de garder un caractère opérationnel.

Les risques de lessivage en conditions de faibles tirants d'eau et de durée d'irrigation moyenne semblent réduits durant la campagne d'irrigation. La présence d'azote résiduel en fin de cycle reporte à l'évidence ces risques en saison hivernale comme en témoigne les profils d'azote établis à partir des prélèvements de sol effectués à la tarière. On se retrouve donc confronté aux problèmes de l'aspersion avec des zones insuffisamment irriguées qui ne permettent pas d'utiliser de façon optimale l'azote

apporté. Ce constat soulève le problème de l'efficacité d'utilisation de l'azote (EUN) par la plante. Les 11 quintaux de différence entre le site en aspersion conduit à l'ETM (138 qx) et le traitement en gravitaire (127 qx) seraient ils dû à un plus faible niveau d'EUN pour ce traitement ? Cette question méritait une réponse. En effet, comme signalé dans Mailhol et al. (2001), les épis de maïs semblent à première vue plus gros tout à fait en aval des raies là où justement les tirants d'eau pouvaient atteindre la limite supérieure des billons. L'objectif de l'essai de 2002 était aussi d'analyser l'impact des conditions d'infiltration à la fois sur les risques de lessivage mais également sur le rendement du maïs. Ce dernier, sujet à un apport d'eau très conséquent (240 mm) délivré au cours du premier arrosage, était susceptible d'accuser une perte de rendement compte tenu des risques de lessivage encourus au voisinage d'un stade critique (besoins élevés en azote). Un suivi de la plante a donc été effectué en comparaison avec le maïs du traitement ETM en aspersion compte tenu que la superficie de l'essai ne nous permettait pas de procéder comme sur le site en aspersion à la collecte de plusieurs placettes de rendement. Sur la base de ces tests comparatifs on a pu estimer un rendement très comparable à celui du traitement ETM soit 142 et 138 qx respectivement pour le site 1 ($h_0 = 12$ cm) et le site 2 ($h_0 = 7$ cm).

Conclusion

Une irrigation insuffisante ou excessive sont toutes deux préjudiciables à l'environnement. Des mesures visant à promouvoir une gestion rationnelle et équitable des conflits d'usage de l'eau sont en train de se mettre en place dans de nombreux pays. Elles devraient encourager les agriculteurs à améliorer l'efficacité de leur irrigation grâce d'abord à une meilleure connaissance des doses délivrées au niveau des parcelles (imposition de compteurs volumétriques), et en adoptant des règles de pilotage pour leurs irrigations.

La modélisation a permis de montrer l'impact que ces règles pouvaient avoir sur les économies d'eau et l'efficacité tant du point de vue hydraulique qu'agronomique. La modélisation a en outre montré que leur mise en œuvre pouvait dans une certaine mesure largement compenser les préjudices qu'occasionnaient les différentes sources d'hétérogénéité. Force est cependant de constater que le degré de liberté de l'agriculteur est dans bien des cas relativement faible. Il est souvent tributaire du tour d'eau, notamment en irrigation gravitaire ou quelque fois contraint par la disponibilité de son matériel dans le cas de l'aspersion. Des solutions doivent être proposées afin d'accroître le degré de latitude de ces agriculteurs. Le rôle des conseillers techniques est important, ne serait ce que pour proposer des avis pertinents en matière d'utilisation et de réglage du matériel. Des travaux en ce sens sont menés par les collègues du Cemagref d'Aix en Pce en collaboration avec les chambres d'agriculture. La connaissance des conditions initiales d'azote sur des sites de références devraient permettre une meilleure gestion des entrants. La réduction des apports d'engrais qui en résulterait devrait contribuer à une réduction du risque environnemental.

Enfin, sans vouloir se porter défenseur de l'irrigation gravitaire, l'expérience montre que bénéficiant de l'apport des techniques modernes et bien maîtrisée, elle peut à moindre coût rivaliser avec des techniques réputés plus efficaces dans de nombreux contextes de sols. Dans les pays du Maghreb, les solutions préconisant l'abandon définitif du système gravitaire au profit de l'aspersion ou du localisé sans envisager des alternatives telles que sa modernisation nécessitent mûres réflexions. Outre la prise en compte des aspects socio-économiques, ceux par exemples liés à la maîtrise de la salinité doivent impérativement être pris en compte.

L'approche conceptuelle pour aborder la modélisation des systèmes complexes que sont les milieux naturels, peut apporter sa contribution à l'identification des risques qu'ils encourent. Il faut néanmoins savoir en apprécier les limites et doser les hypothèses sur lesquelles elle repose. L'approche SOFIP a par exemple montré qu'elle pouvait répondre à l'estimation des risques de drainages à l'échelle d'une parcelle résultant d'une pratique d'irrigation donnée. Les contraintes de pas temps, de pas d'espace et l'accessibilité à certains paramètres sont souvent à l'origine d'hypothèses simplificatrices qui privilégient l'approche conceptuelle à l'approche mécaniste. Le travail présenté a montré que dans une certaine mesure elles peuvent être parfois complémentaires.

L'erreur consiste souvent à vouloir adopter des outils pertinents à une échelle donnée, où les paramètres mis en jeu ont un sens, à une échelle d'espace où ils perdent leur signification. Chaque échelle d'espace semble requérir une modélisation spécifique. Les solutions adoptées visant à composer des résultats acquis à une échelle donnée, avec des outils et des pas de temps considérés adaptés, pour rendre compte des phénomènes à des échelles supérieures ne sont certainement pas les bonnes. Lorsque l'on veut rendre compte de phénomènes identifiés à une échelle fine (qqm² ou d'une parcelle) à une échelle supérieure, il convient d'imaginer des schémas nouveaux capables d'assurer une cohérence d'ensemble.

8. Perspectives de recherche

Mes activités de recherche ont été pour l'essentiel centrées sur la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts sur la ressource en eau. Les préoccupations environnementales étant de plus en plus à l'ordre du jour j'ai orienté depuis quelques années mes recherches vers le thème de l'impact des pratiques d'irrigation sur les pollutions diffuses. Ces recherches ont été menées à l'échelle du site de mesure (qqm²) et à l'échelle de la parcelle agricole avec des approches adaptées au contexte de type

mécaniste (transfert d'eau : modèle de Richards + soluté : Equation Dispers-convec. 1D-2D) ou conceptuel. (approche de type capacitif : modèle PILOTE, modèle STICS, ou modèle MACRO (Larson, (1999) pour sols à effets macropores prédominants). Mon souhait actuel serait de passer à des échelles supérieures en menant une réflexion sur les outils (numériques ? analytiques, couplage vertical : ZNS + ZS ?) et leur adaptation (ou leur éventuel couplage : parcelle → ensemble de parcelles → bv agricole) pour répondre à la problématique du changement d'échelles lorsque la variabilité inter-parcelles (variabilité pédologique, et/ou pratiques différenciées) met en défaut les modèles de type globaux. Rien au demeurant ne permet de préjuger qu'un modèle distribué, pour traiter de la problématique du transfert de solutés à l'échelle d'un bassin versant à vocation agricole, est meilleur qu'un modèle global. Concernant les aspects purement hydrologiques, le débat demeure ouvert et semble tourner à l'avantage des défenseurs de l'approche globale comme en témoigne de récents articles publiés sur ce sujet.

Trois projets de recherches à court et moyen termes sont présentés. Ils sont relatifs aux 3 thèses dont j'ai la charge d'encadrement. Le premier est davantage centré sur la problématique du transfert d'azote en contexte d'infiltration bidimensionnelle, les deux autres ont traité la problématique du changement des systèmes d'irrigation traditionnels en systèmes modernisés au Maghreb et bénéficient des financements du projet FSP -SIRMA (fond de soutien prioritaire -systèmes irrigués au Maghreb).

Le quatrième projet est un projet que l'on peut considérer comme étant à moyen terme. Il s'agit d'un projet AQUAE initié par le Cemagref réunissant une équipe de GEMA (gestion des milieux aquatiques) du groupement de Lyon avec MIE (maîtrise des impacts de l'irrigation) pour analyser l'impact de la pratique du semis direct sur la réduction des risques de pollutions diffuses à l'échelle d'un bassin versant agricole. Cette technique est depuis quelques années utilisée aussi bien en aspersion qu'en gravitaire comme au Mexique et s'avère intéressante pour pallier l'effet de dégradation des propriétés des sols sous irrigation.

Le cinquième projet, que l'on peut qualifier de long terme en raison de la complexité de la tâche d'une part et de la non identification, au demeurant, de candidat potentiel, porte sur le développement d'une approche intégrée visant à simuler l'impact de pratiques d'irrigation localisées sur les risques environnementaux et la production à l'échelle de la parcelle. A son terme, ce dernier projet permettrait de disposer de la panoplie complète d'outils permettant d'analyser l'intérêt d'une technique d'irrigation vis à vis d'une autre en prenant en compte les différentes sources d'hétérogénéité pénalisant l'efficacité au même titre que les contraintes locales (de type socio-économiques par exemples) du contexte étudié. Ce cinquième projet bénéficierait des avancées scientifiques du premier projet concernant la problématique du transfert 2D eau-solutés avec couplage à un modèle de culture.

Dans de nombreux pays notamment du Maghreb se pose le problème du choix entre la modernisation de la pratique du gravitaire et le passage à l'aspersion ou à la micro-irrigation. L'approche développée dans le cadre de mon travail de thèse et celle mise en œuvre dans le cadre du projet européen NIWASAVE pour l'aspersion mériteraient d'être complétées par une approche comparable permettant de traiter le cas de la micro irrigation. La disponibilité de ces trois outils permettant d'apprécier l'impact de différentes sources de variabilité (le climat, le matériel, le sol) sur l'usage de l'eau et la production dans un contexte socio-économique donné, devrait contribuer à l'élaboration de prises de décisions pertinentes pour assurer le maintien d'une agriculture durable. Un projet de thèse a été déposé et un candidat potentiel identifié (chercheur à l'INRGRF de Tunis). Ce dernier point, riche des éléments de recherche évoqués précédemment pourrait constituer une axe de recherche à long terme (3 à 5 ans).

1^{er} projet à court terme

Titre : **Modélisation analytique des transferts 2D eau –solutés avec couplage à un modèle de culture.**

Intérêt et problématique

En dépit d'efforts conséquents relatifs à sa modernisation, l'irrigation de surface, technique d'arrosage la plus répandue dans le monde, génère dans certains contextes, des risques environnementaux en raison des doses massive d'eau et de fertilisants utilisés (Fernandez, et al., 1994). Des pratiques d'arrosage (fréquences d'apports, conduites des arrosages) inadaptées au contexte pédoclimatique sont souvent la cause de gaspillages d'eau et de contamination des nappes par les nitrates. L'irrigation à la raie est une des techniques d'irrigation de surface parmi les plus répandues. Des travaux récents reposant sur des expérimentations (Benjamin et al., 1998 ; Popova et Varlev, 1998, Mailhol et al., 2001 ; Nemeth, 2001 ; Lehrs et al., 2001), attestent que certaines pratiques de fertilisation sont susceptibles de ne générer que de faibles risques environnementaux durant la saison d'irrigation. Il en est de même sous des régimes d'apports élevés d'après les simulations réalisées au moyen de la modélisation numérique adaptée aux transferts bidimensionnels d'eau et de solutés (Mailhol et al., 2001 ; Mailhol 2001, Mailhol et Triki, 2004).

Les transferts 2D sont prédominants en irrigation à la raie notamment en liaison avec une technique de fertilisation qui, conjuguée au traçage des sillons, concentre l'apport de fertilisant sur la partie haute des billons. Sa localisation le soumet essentiellement aux effets capillaires de l'infiltration, seuls des tirants d'eau élevés (en aval des raies bouchées) ou des pluies intempestives sont susceptibles de favoriser sa migration vers des couches plus profondes du sol. Dans ce contexte, il est aisé de comprendre que l'usage d'un modèle de culture reposant sur l'hypothèse d'un transfert 1D eau-soluté est mal adapté pour rendre compte de l'impact conjoint d'une pratique d'arrosage et de fertilisation sur la production et le lessivage d'azote (Mailhol et al., 2001).

Ainsi les conclusions relatives aux risques environnementaux (Nemeth, 2001) résultant de certaines pratiques en vigueur au Mexique, établies sur la base du couplage du modèle d'irrigation RAIEOPT avec le modèle de culture « Stics », ne peuvent être que sujettes à caution. Un besoin d'approche intégrée mieux adaptée à la problématique précédemment évoquée semble ainsi justifiée.

Quelques solutions analytiques ou pseudo-analytiques relatives à la problématique 2D du transfert d'eau en irrigation à la raie existent (Berthomé, 1991, Schmitz, 1993) ou sont en cours de développement ou d'améliorations, ce qui est le cas du modèle FURINF (Wöhling et al., 2004). Elles souffrent cependant d'un manque de validation et leur domaine d'application devrait d'être étendu au contexte des sols à effet macro-pores dominant en s'inspirant du modèle MACRO (Larson 1999).

Objectifs

Un premier objectif aura donc trait au développement d'un modèle analytique (ou pseudo-analytique) permettant de simuler selon un concept mécaniste les transferts d'eau et de solutés dans une section de raie. Ce modèle fonctionnera à un pas de temps adapté à la dynamique des transferts lors d'une irrigation (de l'ordre de la minute). Il permettra en outre de préciser la répartition de l'azote au sein du profil, nécessaire à la définition des conditions initiales relatives au modèle de culture.

Le deuxième objectif concernera le modèle de culture « Stics » qu'il s'agira d'adapter au contexte 2D des transferts d'eau et de soluté en mettant plus particulièrement l'accent sur la redistribution de l'azote dans le profil du sol sous conditions 2D d'infiltration. Il convient de rappeler que « Stics » demeure la référence en matière d'outil permettant de tester l'impact des pratiques agricoles sur la production et l'environnement. Ce modèle de type capacitif fonctionne au pas de temps journalier. L'adaptation majeure de ce modèle consistera soit à compartimenter la distribution d'azote non seulement verticalement (ce qui est le cas dans la version actuelle) mais horizontalement, l'option transfert d'azote de type capacitif devant être nécessairement abandonnée au profit du transfert analytique 2D du soluté propre au modèle d'irrigation (élaboration d'un module transfert d'azote au modèle FURINF)

L'approche qu'il s'agira de développer combinera 2 types de pas de temps :

-un pas de temps court (une à quelques minutes) utilisé pour simuler un arrosage et assurer sur des bases plus ou moins mécanistes la redistribution de l'azote dans le profil du sol à partir de conditions initiales mesurées (avant première irrigation) ou simulées (entre 2 arrosages).

-un pas de temps journalier propre à la version adaptée du modèle « Stics » pour simuler croissance de la culture et disponibilité d'azote dans le profil du sol avant chaque arrosage.

Calage et validation reposeront sur les données acquises durant 2 campagnes d'irrigation à la raie ainsi que d'essais en infiltration statique sous 2 tirants d'eau contrastés (Mailhol et Triki, 2004). Des données émanant de suivis sur cases lysimétriques seront également exploitées. Celles-ci nous seront fournies par nos collègues Bulgares avec lesquels nous démarrons un projet COCOP.

Il est important de noter que l'approche de modélisation développée dans le cadre de ce projet, pourra être largement mise à profit dans le cadre d'un projet de recherche futur ayant trait au développement d'une modélisation de type intégrée permettant d'estimer l'impact de pratiques d'irrigation localisées sur les risques environnementaux et la production à l'échelle de la parcelle.

Avec NIWASAVE (cas de l'aspersion), SOFIP (cas du gravitaire) et l'approche intégrée pour le cas du localisé, on disposera de trois outils permettant de simuler l'impact de pratiques d'irrigation et de fertilisation sur les risques environnementaux et la production concernant les trois principaux systèmes d'irrigation que sont l'aspersion le gravitaire et l'irrigation localisée.

Thésard D. Crevoisier

Bourse Cemagref

Comité de pilotage : Prof. G. Scmitz Univ. Dresde (co-encadrant), M. Vauclin (LTHE), S. Marlet (CIRAD), J.C. Mailhol, P. Ruelle, S. Bouarfa (Cemagref).

2^{ème} Projet à court terme

"Analyse des critères orientant le choix des systèmes d'irrigation dans un contexte socio-économique donné: le cas tunisien"

Dans la plus part des pays en voie de développement la modernisation de l'irrigation se heurte à des facteurs d'ordre socio-économiques. La non prise en compte de ces facteurs a conduit dans bien des situations à un échec des solutions proposées et un retour aux pratiques anciennes. On peut citer pour exemple le passage à l'aspersion dans la plaine du Gharb au Maroc qui pour des raisons liées aux coûts énergétique et aux problèmes de maintenance (Mailhol et al., 1999) s'est soldé par un abandon progressif de la part des agriculteurs de cette technique au profit du gravitaire traditionnel. Les organismes en charge de la gestion de l'eau ont finalement adopté pour projet, dans ce contexte, la modernisation du gravitaire. Il reste cependant à trouver les solutions qui permettront d'appliquer la modernisation du gravitaire au contexte sociologique. La création d'associations d'irriguants pourraient être envisagée comme une de ces solutions.

On perçoit l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'une approche permettant de choisir de manière objective la technique d'irrigation la mieux appropriée au contexte étudié. Les facteurs socio-économiques constituent certes un frein à la promotion de telle ou telle technique innovante en matière d'irrigation. Cependant les facteurs physiques occupent une place tout aussi importante surtout lorsque les contraintes environnementales (ressource en eau limitée, protection des nappes phréatiques) sont fortes. La thèse devra en conséquence proposer une méthodologie visant à faciliter le choix des décideurs en matière de technique d'irrigation. Cette méthodologie argumentera de façon objective en faveur du choix de telle ou telle technique d'irrigation. Elle s'appuiera sur une connaissance du milieu physique en vue de modéliser ses réactions ainsi que sur une connaissance du contexte économique ou socio-économique aspect incontournable en vue du choix d'une solution à même de satisfaire au critère durabilité du système.

L'approche physique du problème concernera l'identification des sources d'hétérogénéité susceptibles de réduire l'efficacité des arrosages et d'avoir des impacts défavorables sur l'environnement. Comment les gérer au mieux de façon opérationnelle selon chacun des deux systèmes que sont l'aspersion et le gravitaire (modernisé ou traditionnel) pourra être un des défis relevés par la thèse. La phase d'identification sera alors suivie de la phase de modélisation en vue de proposer pour chacune des 2 techniques des pratiques ou des solutions améliorantes dont il conviendra d'analyser à la fois le coût et l'applicabilité. Ces deux derniers points font à l'évidence référence au volet socio-économique de la thèse. Volet dont l'importance pourra être ultérieurement définie selon celle prise par le premier.

La problématique:

En gravitaire, l'absence de techniques modernes de planage et la dégradation de ce dernier, liées aux mauvaises conditions de travail du sol, sont les sources majeures d'hétérogénéité qui réduisent l'efficacité des apports d'eau. Ces défauts de planage contribuent au maintien des techniques traditionnelles dont la plupart sont à la fois très consommatrices en eau et en main d'œuvre. Certaines de ces méthodes traditionnelles (la robta) apparaissent néanmoins perfectibles au point d'être mises en balance avec des solutions modernisées certes plus difficilement adaptables au contexte socio-économique.

La question qui se pose est de savoir dans quelle mesure les techniques d'irrigation gravitaire modernisées peuvent réduire les sources d'hétérogénéité et améliorer de manière significative l'efficacité des apports d'eau. Les travaux effectués sur la parcelle expérimentale de Souk-Tleta dans le Gharb (Maroc) ont contribué à l'analyse de ces différentes sources d'hétérogénéité et à les intégrer dans une modélisation visant à améliorer la pratique de l'irrigation à la raie dans le contexte des vertisols du Gharb. Un article a été publié dans AGWAT sur ce thème. L'expérimentation à Lavalette en 99 concernant l'irrigation du maïs en gravitaire a permis la poursuite des travaux initiés au Maroc dont la finalité sera l'élaboration d'un modèle permettant de simuler l'impact des pratiques d'arrosage sur les pertes en eau (efficacité) le rendement de la culture le lessivage des nitrates et ce, à l'échelle de la parcelle et de la saison d'irrigation. (aspects spatiaux temporels). Une première version de ce modèle est actuellement opérationnelle : modèle SOFIP (Mailhol, 2001, Mailhol et al., 2004). Elle ne traite pour l'instant que de la problématique liée à l'eau, qui est la préoccupation majeure de ce projet.

En aspersion: les causes de son abandon, en ce qui concerne l'exemple du Gharb ont été évoquées. Cependant dans certaines régions comme le nord de la Tunisie, le vent peut constituer un frein à son développement au même titre que les problèmes du parcellaire. La variabilité du sol (réserve utile) et les problèmes résultants d'un manque d'entretien du matériel (maintenance), constituent également des sources majeures d'hétérogénéité susceptibles de réduire fortement l'efficacité des arrosages et de causer des préjudices à l'environnement.

Connaissance prise de tous ces facteurs et après avoir analysé leurs impacts, la question est alors de savoir si l'aspersion peut être considérée comme une alternative viable à la méthode retenue concernant le gravitaire. Un élément de réponse est proposé dans l'article (Mailhol et al., 2003).

Le projet NIWASAVE coordonné par le Cemagref d'Aix auquel était associée la cellule MIE de GESTIRRI a largement traité de ces problèmes d'hétérogénéité (Ruelle et al., 2003) et un logiciel permettant d'analyser leur impact est actuellement disponible (NIWASAVE).

L'irrigation localisée, système réputée pour être économe en eau, se développe à la faveur de subventions conséquentes accordées aux agriculteurs par l'état. Cependant en raison d'une mauvaise maîtrise et de contraintes locales, les doses et leur variabilité au sein de la parcelles s'avèrent être parfois très élevées selon enquêtes et suivis effectués chez des agriculteurs comme déjà évoqué (Slani, et al., 2004).

Le volet éco ou socio-économique

L'augmentation du niveau d'efficacité de l'eau d'irrigation et son maintien a un coût pour chacun des deux modes d'irrigation que sont le gravitaire modernisé (ou traditionnel amélioré) et l'aspersion. Quant aux aspects environnementaux le problème se pose aussi en terme de durabilité du système. Aussi, il conviendra de trouver la façon la mieux adaptée de prendre en compte de façon

économique leurs impacts dans un contexte où la pression sur la ressource ainsi que sont coût sont parfois élevés comme c'est le cas en Tunisie.

Des sites expérimentaux

Tant en Tunisie qu'au Maroc existent des sites expérimentaux permettant de comparer les différentes techniques et de caler et valider les modèles permettant de tester l'impact d'améliorations possibles. Enfin, pour compléter ce dernier atout majeur, des enquêtes sur les pratiques des agriculteurs ont déjà été effectuées en Tunisie.

Thésard : A. Sltani (INRGREF Tunis)
Financement FSP, accord DS du Cemagref
Co-tutelle Mr Zaini INA Tunis

3^{ème} Projet à court terme

Titre : L'irrigation gravitaire modernisée pour évacuer les excès d'eau hivernaux et satisfaire les besoins en eau des plantes dans le contexte des vertisols du Gharb

Le sujet a trait à l'évaluation des performances des systèmes d'irrigation gravitaire à la raie, avec une prise en compte conjointe des contraintes d'excès d'eau hivernal et de déficit estival de la betterave à sucre. Une bonne – et nécessaire – intégration de ces processus et le transfert des résultats auprès des agriculteurs constitue un enjeu majeur pour la durabilité environnementale et économique du périmètre irrigué du Gharb. L'association d'une problématique conjointe d'irrigation et de drainage de surface au moyen des raies d'irrigation, constitue l'originalité du travail envisagé. Ce sujet s'inscrit dans le contexte de la politique d'économie de l'eau conduite par le Maroc dans la mesure où les engorgements hivernaux réduisent les potentialités des cultures d'hiver qui ne peuvent ensuite bénéficier pleinement des effets de l'irrigation, diminuant la valeur ajoutée du m³ d'eau. Il doit également contribuer à la réhabilitation de l'irrigation gravitaire au Maroc en démontrant en particulier l'intérêt du recours au nivellement des sols dans un contexte où les systèmes sous pression génèrent des coûts énergétiques de moins en moins supportables pour les offices publics d'irrigation.

Le travail de modélisation consistera à caler et valider un modèle de ruissellement (ce dernier devra tenir compte de la remontée de la nappe) pour évacuer les excès d'eau hivernaux qu'il s'agira ensuite de coupler au modèle SOFIP, modèle permettant de simuler à l'échelle de la parcelle l'impact d'une pratique d'irrigation sur l'efficacité (risques de drainage et de lessivages) et le rendement de la culture.

Thésard : A. Taky (Ing. ORMAVG, Kenitra, Maroc)
Financement FSP, accord DS du Cemagref
Co-tutelle Pr. A. Debbah (ENA Meknes, Maroc)

4^{ème} Projet à court et moyen terme

Projet de recherche AQUAE EEE –GEMA sur le thème pollutions diffuses à l'échelle d'un bassin agricole

Un projet de recherche Cemagref sur le thème des pollutions diffuses d'origine agricole devrait démarrer l'année prochaine. Autour de ce thème se trouveraient réunies une équipe de GEMA (Lyon) et la cellule maîtrise de l'irrigation et de ses impacts environnementaux (MIE) à laquelle j'appartiens. L'objectif de ce projet serait d'analyser l'impact de la technique du semis direct sur les risques de pollutions diffuses à l'échelle d'un bassin versant agricole. L'équipe MIE de Montpellier qui mène des expérimentations sur cette technique depuis 2001 sur le site expérimental de Lavalette a acquis une expérience dans ce domaine.

La technique du semis direct largement utilisée aux US et en Amérique latine commence à prendre de l'ampleur en France ainsi que dans certains pays européens en particulier en Espagne. La suppression du labour outre l'économie qu'elle engendre, assure un maintien des propriétés physico-chimiques des sols. Cette technique permet en outre d'éliminer l'usage de certains pesticides reconnus dangereux ainsi que de réduire les apports d'engrais azotés dès que le système est bien en place, ce qui est généralement le cas dès la 2^{ème} année. Seul le glyphosate, pesticide donné pour être sans effets dommageables pour l'environnement, est utilisé pour détruire la culture d'inter-saison (une graminée, vesce, orge, ou avoine). Cette culture contribue à la constitution du paillis au même titre que les résidus de la culture principale et tient lieu de "pompe à azote". Les rendements obtenus selon cette pratique sont quasi équivalents à ceux obtenus selon le système traditionnel (avec travail du sol). Les taux élevés de pesticides dans les rivières drainant des zones agricoles résultent la plupart du temps de l'entraînement, par ruissellement, des particules de sols auquel il est lié. La présence de paillis réduit ou annule le ruissellement et par là même la quantité de pesticide (glyphosate et désherbant de la culture principale) pouvant atteindre l'émissaire principal.

Dans le cadre d'un tel projet des modèles tels PRZM (Carsel, et al., 1984) ou PRZM2 (Mullins et al., 1993) pourraient être mis à contribution pour permettre la prise en compte des différents processus à la surface du sol (en particulier ruissellement et érosion) et dans la zone racinaire et entre zone racinaire et la nappe (PRZM2).

La collaboration avec GEMA serait, pour la cellule MIE, une opportunité de participer aux réflexions relatives à la problématique du changement d'échelle en vue de modéliser les transferts de polluants émanant de parcelles ou d'ensembles de parcelles agricoles. Vers quels types d'approche convient-il de s'orienter pour que l'outil de modélisation mis en œuvre soit capable de simuler l'impact des changements de pratiques agricoles sur les pollutions diffuses à l'échelle d'un bassin à vocation agricole ?

Mes compétences en hydrologie des bassins versants et en processus de transfert à échelle parcelle ou site de mesure pourraient être un atout pour la réussite du projet.

Projets à long terme : Approche intégrée en micro-irrigation

On dispose d'un outil (NIWASE) permettant de simuler l'impact des sources d'hétérogénéités (vent, matériel, sol) sur les risques environnementaux et la production. Une approche intégrée pour le cas de l'irrigation à la raie a été récemment développée (Mailhol, 2001 ; Mailhol et al., 2004). Elle permet de simuler l'impact d'une pratique d'irrigation sur les risques de percolation profonde et le rendement. Cette approche conceptuelle (modèle SOFIP) permet la mise en évidence des risques locaux de percolation profonde. Une modélisation mécaniste adaptée aux transferts 2D permet de vérifier si ces risques sont oui ou non synonymes de lessivages d'azote en liaison avec la technique de fertilisation utilisée (Mailhol et al., 2001). Le projet n°1 se propose de répondre plus directement à la problématique azote. Compléter la panoplie d'outils par un même type d'approche pour le cas de l'irrigation localisée paraît digne d'intérêt, d'autant que cette technique est de plus en plus à l'ordre du jour au Maghreb pour les raisons précédemment évoquées. Les sources d'hétérogénéités susceptibles d'accroître les risques environnementaux résultent dans le cas du goutte à goutte de l'effet combiné du sol et du matériel. Bien souvent le matériel fonctionne sous des charges hydrauliques insuffisantes et très variables au niveau de la parcelle. En outre, la qualité de l'eau et les colmatages des distributeurs qui en résulte induisent une variabilité importante des doses appliquées. Pour compenser l'impact de cette variabilité sur les chutes de rendement possibles, le recours à la sur irrigation est bien souvent pratiqué. En règle générale, une absence de maîtrise de cette nouvelle technique conduit dans

certains cas l'agriculteur à irriguer comme il irriguait en gravitaire (Château, 2003, mémoire ENGEES, Slatni et al, 2004). Ce comportement évidemment contribue à accroître les risques environnementaux puisque la fertigation est largement utilisée.

On a en fait commencé à aborder ce projet en reprenant les travaux de Revol (1994) qui proposaient une approche analytique de l'infiltration sous goutteur. La présence au sein de notre équipe d'un chercheur australien pour une durée de 6 mois, nous a permis de faire le point sur l'état de l'art en matière de transfert eau-soluté avec prise en compte de l'extraction racinaire selon des approches analytiques. La collaboration avec le thésard traitant de la problématique des transferts analytiques 2D sur le cas de la raie contribue à faire avancer efficacement ce projet.

Dans la continuité de ces travaux menés sur la problématique de la reconversion des systèmes traditionnels, et en s'inspirant des prérogatives de l'Agence de l'eau RMC au sujet de la pertinence du maintien du gravitaire dans le sud-est de la France, l'impact d'un changement des pratiques d'irrigation sur l'éco-système (évolution des nappes, salinité, etc..) du bassin versant pourrait faire l'objet de recherches approfondies à beaucoup plus long terme. Une gestion efficace de la répartition de l'eau en provenance des barrages (à l'origine allouée au gravitaire) et en provenance de la nappe pour l'essentiel allouée à l'irrigation localisée), (les deux ayant des taux de salinité bien souvent différents), pourrait contribuer à améliorer la durabilité du système.

9. Références bibliographiques autres que celles où figure l'auteur de ce mémoire :

- Augier, P., 1996. Contribution à l'étude et à la modélisation mécaniste statistique de la distribution spatiale des apports d'eau sous un canon d'irrigation : application à la caractérisation des effets du vent sur l'uniformité d'arrosage. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Montpellier, France.
- Alves, I., Perrier A., and Pereira L.S., 1996 Penman-Monteith equation : how good is the big leaf ? . Proc. Of intern. Conf. On Evapotranspiration and irrigation scheduling. 3-6 Nov 1996 San Antonio 599-605p.
- Benjamin J.G., Porter, L.K., Duke, H.R., Ahuja, L.R., Butters, G., 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertiliser band placement. Soil Sci. Soc. Am. J. 62 1103-1108.
- Bentura, L.F., et Michel C., 1997. Flood routing in a wide channel with a quadratic lag-and-route method. Hydrological Sci Journ. 42(2) 169-180.
- Berthomé, P., 1991. Modélisation de l'infiltration en irrigation à la raie: Résolutions numérique et analytique, Application à l'étude de la conduite des arrosages. PhD, (Inst. Polytec. de Toulouse, 1996p.)
- Blaine R. Hanson 1987. A system approach to drainage reduction (Californian Agriculture, Sept. 1987, 19-24p.
- Brisson, N., 1991, Perrier, A., 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. Water Resour. Res. 27, 1, 719-727.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeufroy, M.H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne-Barret 1998, F. Antonioletti, R., Durr C., Richard G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., 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 balances. I. Theory and parametrisation applied to wheat and corn. Agronomie, No 18, 311-346.
- Burt, C.M., A.J. Clemens, t.s., Strelkoff, K.H. Solomon, L., T. Howell, D. Eisenhauer, R. Bleisner. 1997. Irrigation performance measures .. Efficiency and uniformity, J. Irrigation and Drainage Engineering 123(6) : 423-442.
- Cargnel, M.D., Orchansky, A.L, Brevedan, R.E, Luayza G, and Palomo, R., 1996 Evapotranspiration measurements over a soybean crop Proc. Of intern. Conf. On Evapotranspiration and irrigation scheduling. 3-6 Nov 1996 San Antonio, 304-308.
- Château, G. 2003. Diagnostic des pratiques d'irrigation localisée dans la Medjerda : le cas de la tomate de plein champ, mém. ENGEES, 120 P.
- Cabelguenne, M., Marty, J.R., Hilaire A., 1982. Comparaison technico-économique de la valorisation

- de l'irrigation par quatre cultures d'été (maïs, Soja, sorgho, tournesol), *Agronomie*, 2(6), 567-576.
- Cemagref, DIREN, 1992. Evaluation à l'échelle régionale des besoins en eau et du rendement des cultures selon la disponibilité en eau. Application au Bassin Adour-Garonne. Rapport d'étude
- Chazalon, J.M., 1995. La gestion de l'eau dans l'exploitation agricole : Etude comportementale cas des exploitations de grandes cultures du Nord Charente, DEA Sociétés Aménagement et Développement local, Univ., de Pau, 108 pp.
- Clemmens, A.J., 2002. Measuring and improving irrigation performance at the field level. Submitted to *Trasa*. Of ASAE
- DDA, SCP, Cemagref, ARDEPI, 1989. ARTHEMIS Acquisition des références technico-économique sur les matériels d'irrigation de surface.
- De Boer, D.W., Stange, K.A., Beck, D.L., 2001. Sprinkler and corn canopy effects on water application characteristics. *J Irrig. and Drain. Enginr.* 127(5) : 272-276.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water, *Irrig. and Drain.* Paper n°33, FAO, Rome (Italie), 235p.
- Dubalen, J., 1993. Utilisation des matériels d'irrigation par aspersion. Diagnostic de fonctionnement au champ. *La Houille Blanche* 2/3, 183-188.
- Elliot, R. L., and Walker, W. R., 1982. Field evaluation of furrow irrigation and advance functions. *Trans. ASAE*, 25(6), 396-400.
- Feddes, R. A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield, simulation monographs, 188p., Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Fernandez, J.E., Moreno, F., Cabrera, J.M., Murillo, E. Fernandez-Boy, 1994. Water and nitrogen use efficiency in a maize crop in southern Spain. Intern. Confer. on land and water resource management, in the Mediterranean region. 27 sept-2 oct. 194, Vol I. Inst. Mediter. Bari, Italy.
- Gardner, W.R., 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation. *Soil Sci.* 85:228-232.
- Girousse, J.C., 1987. Estimation des volumes stockés en surface au cours d'un arrosage à la raie. Mémoire de D.E.A., USTL Montpellier.
- Gonzalez Gamacho J.M., (1991). Modélisation stochastique d'une irrigation à la raie. Thèse de doctorat (PhD), Univ Montpellier II, 270p.
- Green, W.H., Ampt G.A., 1911. Studies in soils physics. 1. The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.*, 4:1-24
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, J.L., Schmitz, G., Fuentes, C., 1990. Infiltration under ponded conditions. 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Sci.* 149:292-300.
- Huber L., 1992. Pertes par évaporation en irrigation par aspersion, Etat des connaissances et éléments d'estimation, Agence de l'eau Loire Bretagne, INRA, 1992.
- Itier, B., Brunet, Y., McAnemey, R.H., and Lagouarde, J.P. 1994. downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part II :Measurements over barley, *Agric. for Meteorol*, 71, 227-245.
- Itier B., et Brunet Y., 1996. Developments and present trends in evaporation research : A partial survey. Proc. Of intern. Conf. On Evapotranspiration and irrigation scheduling. 3-6 Nov 1996 San Antonio 1-20.
- Kutilek M., Nielsen, D.R., 1994 *Soil hydrology: textbook for student in soil science* Cremling-Destedt Catena-Verl, 1994. 370 p.
- Lamacq, S., and Wallender, W., W., (1994). Soil water model for evaluating water delivery flexibility *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, ASCE, 120(4), 756-774.
- Larson, M., 1999. Quantifying macropore flow effects on nitrate and pesticide leaching in a structured clay soil. Doctoral thesis, Swedish Univers. of Agric. Sci. Uppsala, 100p
- Louie, M.J., Seller, J.S., 2000. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. *J. Irrig Drain. Eng.* 126 (3), 142-148.
- Montero, J., Taruello, JM, Carrion, P., 2001. SIRIAS, : a simulation model for sprinkler irrigation II calibration and validation of the model *Irrig Sci* 20 85-98.

- Nemeth, I., 2001. Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un périmètre irrigué au Mexique. Thèse de doctorat Univ Montp. II 205p +annexes.
- NIWASAVE European project 1999 Cemagref, ETSI-UCLM, Silsoe College Cranford Unvers., INRA, Cometal, Komet, FAIRI 1 CT 950088 (EU DG VI) Water Agric. and Envir. Interactions. Reducing the impacts of water application heterogeneity on : nitrates leaching, water losses and economic yields.
- Olufayo, A., 1994. Caractérisation des réponses du sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'indicateurs bioclimatiques, Thèse de doctorat ENSA Rennes, 97p.
- Oyonarte, N.A., Mateos, L., and Palomo M.J., 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. *J. of Irrig. and Drain. Engin.*, 128: 1(26), 26-33.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy Soc. (London)* A193:120-145.
- Pereira L.S., Perrier A, Allen R.G. and Alves, I.,1996. Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. *Proc. Of intern. Conf. On Evapotranspiration and irrigation scheduling.* 3-6 Nov 1996 San Antonio 109-115p.
- Pereira L.S., Oweis, Th., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manage.*, (57) 175-206.
- Perroux, H.L., and White, I., 1988. Design for disc permeameter . *Soil Sci Soc. Am. J.* 52:1205-1215.
- Philip, J.R., 1973. On solving the unsaturated flow equation: 1. The flux concentration relation. *Soil Sci.* 116:328-335.
- Philip, J.R., 1984. Steady infiltration from circular cavities. *Soil Sci. Soc. Am.*, (5) 48.
- Picheral, I., 1993. Validation de l'approche "BILANREG" pour évaluer la consommation en eau des cultures. Mémoire de DESS, Univ. Paris VI, 100p.
- Pitts, D., Peterson, K., Gilbert, G., Fastenau, R., 1996. Field assement of irrigation system performance. *Appl. Eng. Agric.* 12 (3) 307-313.
- 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.
- Revol, Ph, 1994. Caractérisation hydrodynamique des sols par infiltration axisymétrique et modélisation simplifiée de la micro-irrigation. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble I, 224 p.
- Rendon, L, 1987. L'irrigation à la planche : Développement et évaluation d'un nouveau modèle hydrologique pour simuler et prédire l'avancement du front couplé à l'infiltration. Thèse de doctorat, Univ. J. Fourier, Grenoble, France, 174p.
- Richards P.J., and Wetherhead E.K., 1993. Prediction of rain gun patterns in windy conditions. *J. Agric Eng Res* 54 (4) 281-291.
- Richie, J.T., Kinity, J.R., Jones,C.A., Dyke, P.T., 1986. Model inputs In : CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development(C.A., JonesandJ.R.,Kinity, eds.), pp. 38-48. Texas A & M University Press, College Station, Texas.
- Rosenbrock, H., 1960. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer J.*, 3 (Oct): 175-184.
- Ruelle, P., 1995. Variabilité spatiale à l'échelle de parcelles de cultures: Etude expérimentale et modélisation des bilans hydriques et des rendements. Thèse de doctorat, UJF Grenoble I, 210p.
- Santos, F.L., 1996. Quality and maximum profit of industrial tomato as affected by distribution uniformity of drip irrigation system. *Irrig. Drain., Syst.* 14 (3) , 207-222.
- Schmitz, G.H and G.J. Seus, 1992. Mathematical zero inertia modeling of surface irrigation. *Advance in furrows. J of Irrig. and Drain Engin. ASCE.* 118(1) 1-18.
- Schwankl, L., J., Raghuwanshi, and Wallender, W.W. (2000). Furrow irrigation performance under spatially varying conditions. *J. Irrig. and Drain. Eng.*, ASCE, 126 (6) 355-361.
- Seginer, I., 1987. Spatial water distribution in sprinkler irrigation. In Hillel, D., (Ed) . *Advances in irrigation.*, Vol 4. Academic Press, Orlando, pp.. 119-168.

- Simunek, J., Sejna, M., and Van Genuchten, M.Th., 1999. The HYDRUS-1D and HYDRUS-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solutes transport parameters. *Agron Abstr* 357.
- Slama, F., Bahri, Bouarfa, S., Chaumont C, 2004. Pratiques d'irrigations et rôle du drainage pour le contrôle de la salinité- cas du périmètre irrigué de Kalaât Landelous en Tunisie.), Séminaire Euro-Méditerranéen " la modernisation de l 'agriculture irriguée", 19-21 Avril 2004 Rabat (Maroc).
- Steiner, J.L., Kamernasu, E.T., Clark, R.N. 1983. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system. *Trans. Of ASAE*, 26(4), 1128-1134.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.J.C., Vachaud, G., Pereira, A., 1995. Modelling of furrow irrigation. *Advance with two dimensional infiltration. Agric. Water Manag.* 28 201-221.
- Tajuelo, J.M., de Juan, J.A., Valiente, M., Garcia, P., 1996. Model for optimal pattern within the farm based on crop water production function and irrigation uniformity. II. A case study of irrigation scheduling in albacete Spain *Agric. Wter Manage.*, 31, 145-163.
- Todd, R.W., Klocke, N.L., and Arkebauer, T.J., 1996. Latent heat fluxes from developing canopy portioned by energy balance-combination models. *Proc. Of intern. Conf. On Evapotranspiration and irrigation scheduling.* 3-6 Nov 1996 San Antonio 606-612.
- Triki K., 2002. Etude expérimentale et modélisation des transferts 2D eau-solutés DEA Mécanique des milieux naturels Marseille, 72 p + annexes.
- Tron G., Peyremorte P., Berthomé P., 1987. Développement des moyens pour améliorer la conduite des irrigations de surface : Conduites des arrosages en systèmes gravitaire modernisés rapport d'étude 80p.
- Vachaud, G., Dancette, C., Sonko, and Thony, J.L., (1978). Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44:892-898.
- Walker, W.R., 1993. SIRMOD a surface irrigation simulation software. *Depart. of Biological and irrig. Engin Utah State Univers Logan, UT* 84322-4105.
- White, I., and Sully, J., 1987. Macroscopic and microscopic capillarity length and time scales from field infiltration, *Water Resour. Res.*, 23, 1514-1522.
- Zanolin, A., 2003. Irrigation de précision en petite Beauce: Mesures au champ et modélisation stochastique spatialisée du fonctionnement hydrique et agronomique d'une parcelle de maïs. Thèse de doctorat Paris 6. 187p + annexes.

Annexe 1

Le modèle PILOTE

Le modèle nécessite les grandeurs climatiques journalières suivantes : Pluie, ETP, Rayonnement, et température moyenne. Au niveau du sol il requiert la teneur en eau à la capacité au champ F_c ainsi que la teneur en eau au point de flétrissement W_p . Lorsque l'on fait tourner le modèle sur un cycle de culture il convient de connaître le stock 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 température de base, température d'émergence et celle relative aux différents stades, le LAI_{max} , 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), le K_{cmax} . D'autres 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 du LAI quoique celle-ci soit surtout dépendante du seuil de températures T_f permettant l'atteinte du LAI_{max} . La valeur 1.25 identifiée sur le cas du sorgho et du tournesol (Mailhol et al, 1997) pour le coefficient d'aversion au stress λ 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 extrême 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 1). 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 (R_1) à profondeur fixe P_s ($P_s = 0.1$ m) gère l'évapotranspiration après un apport d'eau. Il a une capacité maximale $R_{1max} = RU P_s$. Le réservoir superficiel alimente par drainage (d_1) le réservoir sous-jacent R_2

$$d_1(j) = \text{Max}\{0 ; R_1(j) - R_{1max}\} \quad (1)$$

évolutive avec l'enracinement dont la profondeur est simulée selon l'expression:

$$P_r(j) = P_r(j-1) + V_r \quad (2)$$

, où V_r est la croissance racinaire en mètre par jour. Dans un certain nombre de modèles la croissance racinaire est rattachée à la thermique. C'est du reste une des options possibles du modèle qui fait en sorte de faire coïncider l'atteinte de la profondeur maximale 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 que les conditions de sol (degré de compaction) agissent également sur la progression racinaire il apparaît souhaitable de privilégier l'option permettant de fixer V_r qui offre plus de souplesse.

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 à 15 jours pour les cultures d'été (maïs, tournesol, sorgho, soja) et à un mois pour le blé. 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 linéaire de 0.3 m à P_x :

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 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, 2000) 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 $i-1$.

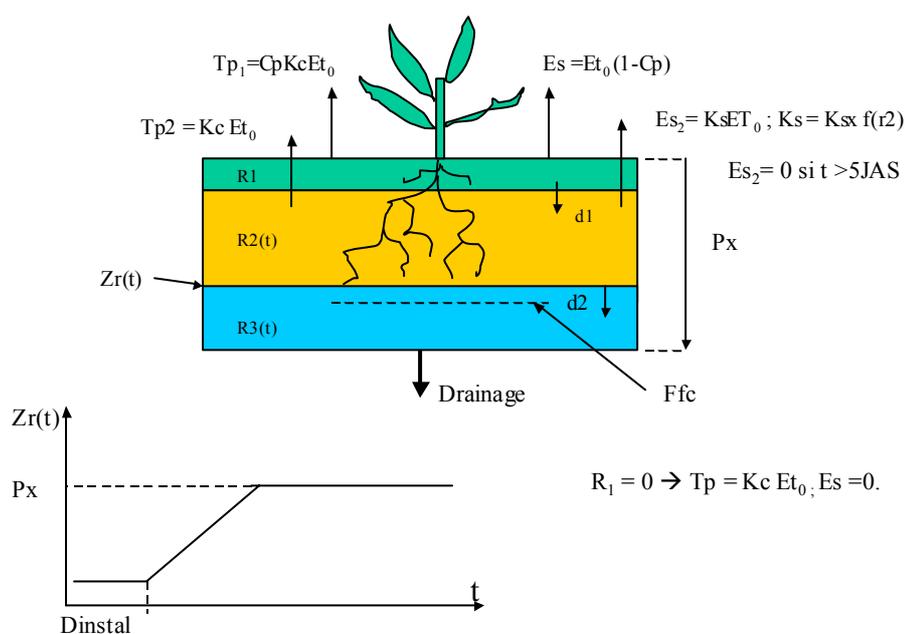


Figure 2. Schéma de fonctionnement du module sol de PILOTE

A chaque pas de temps, R_2 s'accroît de la valeur ΘV_r où V_r est la vitesse de progression racinaire (m/j) et Θ (mm/m) la teneur en eau de la couche sous le front racinaire. La valeur de Θ dépend des positions respectives (calculées à chaque pas de temps) des 2 fronts : le front saturé (à la capacité au champ)

$$Pcr(j) = Pcr(j - 1) + \frac{d_1(j)}{(RU - \Theta_{ini})} \quad (3)$$

et le front racinaire. La valeur prise par Θ est soit Θ_{ini} (mm/m), stock initial, ce qui signifie que le drainage n'a pas rechargé les couches en deçà du front racinaire, soit la valeur de Ru ce qui signifie que le drainage a saturé en partie ou en totalité les couches en deçà du front racinaire. Le drainage D est quand à lui calculé selon:

$$D = \text{Max}\{0 ; R_3 \text{max} - R_3\} \quad (4)$$

, où $R_3 \text{ max} = RU [P_x - Pr(j)]$.

On suppose que l'ETR égale l'ETM (évapotranspiration maximale) tant que le premier réservoir contient de l'eau. 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 $Rs(t)$ définie selon:

$$Rs(t) = (1 - K_{ru}) \cdot P_r(j) \cdot Ru \quad (5)$$

, où K_{ru} le paramètre de Doorenbos et Kassam (1979) égal au rapport RFU/RU . L'évapotranspiration maximale $ETM = Kc ET_0$, où Kc est le coefficient cultural et ET_0 l'évaporation de référence obtenue par application de la formule de Penman (1948).

La profondeur $Ps = 10$ 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

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 premiers jours faisant suite à une pluie, 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 stade du processus d'évaporation que propose la littérature (in Hillel, 1980 chap. 5; in Campbell, 1985, chap.9) avec ce phénomène

Le module plante (calcul du rendement)

L'indice foliaire LAI, est un témoin visible des potentialité 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 Pihélios, 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:

$$TT_{(j)} = \sum_{k=1}^{k=j} (T_{moy} - T_b) \quad (6)$$

où T_{moy} est la température moyenne journalière et T_b la température de base (6° pour la plus part des grandes cultures). L'expression du LAI est donnée par:

$$LAI_{(j)} = LAI_{max} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^\beta \exp \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^\alpha \right) \right\} - (1 - stress^\lambda) \right] \quad (7)$$

où LAI_{max} 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 culture, et en particulier pour le maïs, correspond au cumul de températures entre semis et floraison.

Les paramètres α et β sont des paramètres de calage. Le paramètre α permet à la fois de simuler croissance et sénescence. Le modèle assure le passage de $\alpha = \alpha_1$ à $\alpha = \alpha_2$ lorsque TT dépasse t_m . On a donc en fait 3 paramètres à caler le dernier α_2 , pouvant l'être séparément de α_1 et de β . Une valeur faible de α_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 λ 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 λ peut être adoptée pour les grandes cultures (blé, maïs, soja, tournesol, sorgho,...). L'indice de stress est formulé selon l'expression:

$$stress = \frac{\sum_{j-10}^j Tp}{\sum_{j-10}^j Tpm} \quad (8)$$

où Tp est la transpiration réelle et Tpm est la transpiration maximale :

$$Tpm_{(j)} = Cp Kc ET_0 \quad (9)$$

avec pour facteur Cp , assurant le partage entre évaporation et transpiration:

$$Cp_{(j)} = [1 - \exp(-0.7 LAI)] \quad (10)$$

et :

$$Kc_{(j)} = Kc_{max} (1 - \exp(- LAI(j))) \quad (11)$$

Kc_{max} étant la valeur maximale possible du coefficient cultural pouvant être obtenue dans la littérature (Bulletin F.A.O. 24 par exemple) lorsque les conditions d'advection ne sont pas trop importantes (ex: $Kc_{max} = 1.2$ pour maïs, et blé). Contrairement aux précédentes versions, les Kc sont directement obtenus à partir de la simulation du LAI. Ils sont de ce fait adaptés aux conditions environnementales.

L'évaporation du sol affecte le premier réservoir selon l'expression:

$$Esol = (1 - Cp) ET_0 \quad (12)$$

En l'absence de culture ce premier réservoir est donc soumis à ET_0 jusqu'à épuisement. Lorsqu'il en est ainsi les couches sous-jacentes s'épuisent beaucoup plus lentement selon $K_{s_{nu}} ET_0$, $K_{s_{nu}}$ pouvant décroître (selon une exponentielle) en fonction de la teneur en eau de R_2 depuis $K_{s_{max}}$ (fixé à 0.3) jusqu'à 0. 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. La quantité d'eau ne pouvant lui être extraite est prélevée dans R_2 avec ou sans réduction selon :

$$KcET_0 \min [1., R_2(t)/R_s(t)] \quad (13)$$

Le calcul du Rendement en matière sèche

Le modèle calcule le rendement final en grain selon l'expression:

$$Y_a = Y_m \text{ MIN} \{1; LAImoy/LAIopt\} \quad (13)$$

où Y_m est le rendement en conditions non limitantes en eau. $LAImoy$ 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).

$$LAImoy = 1/N_j \sum_{ts1}^{ts2} LAI(j) \quad (14)$$

$LAIopt$ 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 $LAIopt$ est de l'ordre de 90% du LAI_{max} . 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 grain est le produit de la matière sèche aérienne par l'indice de récolte potentiel HI_{pot} et $S(j)$ la rayonnement solaire incident ($J m^{-2}$) dont la somme est calculée depuis la date de semis jusqu'à la date de maturité définie en somme de température t_{mat} (accessible dans la littérature)

$$Y_m = HI_{pot} RUE \sum_{semis}^{maturité} S_{(j)} I_{(j)} \quad (15)$$

$I_{(j)}$ est la fraction de la radiation solaire interceptée (Moussi et Sacki, 1953):

$$I_{(j)} = 1 - e^{-k LAI(j)} \quad (16)$$

avec $k = \min(1.0, 1.43 LAI^{-0.5})$: extinction coefficient (Zaffaroni et Schneider, 1989)
 RUE ($g MJ^{-1}$) est l'efficacité d'interception. Elle représente l'efficacité 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_m est comparable à celle proposée par Villalobos et al., (1996) et Chapman et al. (1993)

Modélisation de l'indice de récolte HI

La prédiction de l'indice de récolte 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 Hipot, 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:

$$HI = \text{Min} [HI_{\text{pot}} ; (HI_{\text{pot}} - a_r (LAI_{\text{st}} - LAI_{\text{moy}}))] \quad (17)$$

où LAI_{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.

Autres exemples de validation du modèle PILOTE sur le cas du maïs

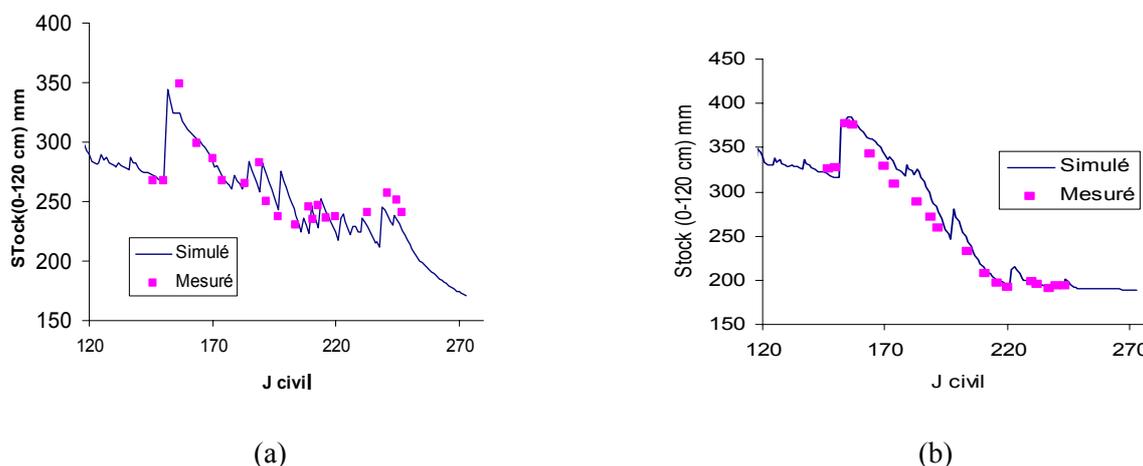


Figure 2 Simulation du stock hydrique traitement ETM (a) et sec (b) en 1997 à Lavalette

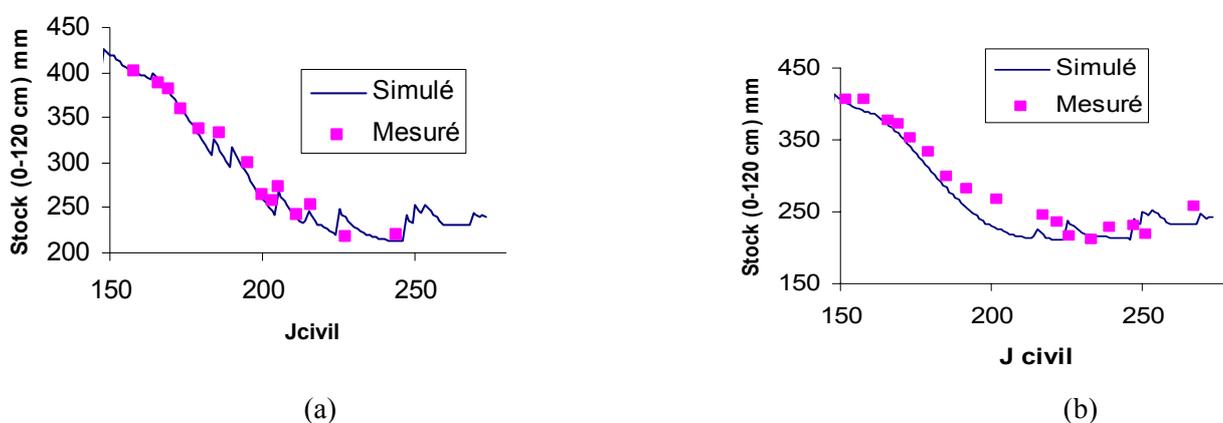


Figure 3. Simulation traitement intermédiaire (a) et traitement en sec (b) en 1998

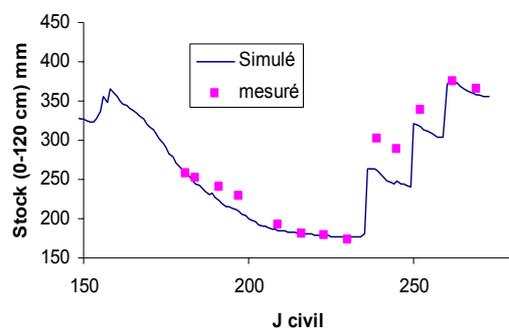


Figure 4. Simulation du stock hydrique du traitement sec en 2002.

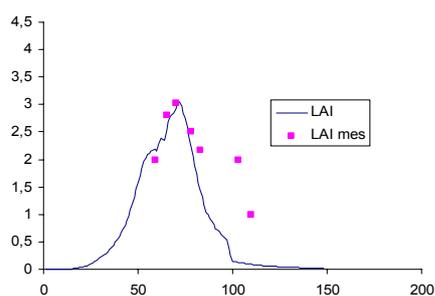
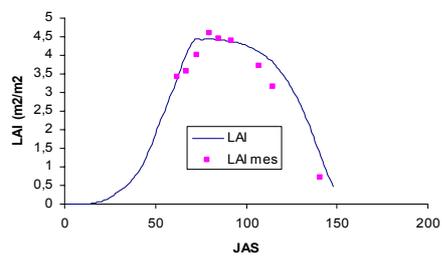


Figure 5. Simulation du LAI du traitement à ETM et en sec en 2002

Annexe 2

Annexe 2

Le code numérique HYDRUS-2D appliqué au cas des transferts Eau-Azote en irrigation à la raie :

Nous proposons de faire une succincte description du modèle HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) permettant de résoudre en 2D les équations aux dérivées partielles régissant les transferts d'eau (modèle de Richards) et de solutés. Un exemple d'application au cas du transfert d'eau et de soluté dans une section de raie au cours de la campagne d'irrigation de 1999 à Lavalette (Cemagref Montpellier) sur le cas d'un sol limoneux avec une culture de maïs. Le modèle, après calage et validation est utilisé dans un premier temps pour analyser certaines hypothèses sur lesquelles reposent des modèles simplifiés tels que RAIEOPT ou l'importance de certaines sources de variabilité occultées dans l'approche SOFP. Dans un deuxième temps il est utilisé pour rendre compte du transfert d'azote dans le cas 2D de la raie en liaison avec la technique de fertilisation adoptée. Il permet, au demeurant, de compléter les informations fournies par SOFIP concernant les risques de lessivage d'azote résultant d'une pratique d'irrigation.

A/ Le transfert d'eau

1-L'équation de base : le modèle de RICHARDS (1930)

Avec les hypothèses d'un milieu poreux rigide dans lequel l'air joue un rôle négligeable dans un processus d'écoulement de l'eau de type Darcien, l'équation modifiée de Richards en 2D s'exprime selon:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K (K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] - S \quad (1)$$

,où h la tension de l'eau [L] est l'inconnue, S un terme puits [T^{-1}], x_j ($j=1,2$), les coordonnées d'un point de l'espace [L], K_{ij}^A sont des composantes d'un tenseur d'anisotropie K^A , et K est la conductivité hydraulique [$L T^{-1}$] donnée par :

$$K(h,x,z) = K_s(x,z)K_r(h,x,z) \quad (2)$$

, où θ est la teneur en eau, K_r est la conductivité relative et K_s la conductivité hydraulique à saturation. Le tenseur d'anisotropie permet de rendre compte d'une anisotropie du milieu. Dans le cas nous concernant, à savoir l'écoulement dans une section plane, $x_1 = x$ est la coordonnée horizontale et $x_2 = z$, la coordonnée verticale affectée d'une convention de signe (ici: $\uparrow+$).

2. L'extraction racinaire

Le terme puits S représente le volume d'eau déplacé par unité de temps d'une unité de volume de sol due à la consommation de la plante. Le terme S est défini selon Feddes et al (1978) selon:

$$S(h) = a(h)S_p \quad (3)$$

,où la fonction stress hydrique $a(h)$ est une fonction adimensionnelle ($0 \leq a \leq 1$) et S_p la consommation en eau potentielle de la plante [T^{-1}]. Lorsque le régime de consommation potentielle est également distribué dans a domaine rectangulaire à 2 dimensions S_p s'exprime alors selon:

$$S_p = \frac{1}{L_x L_z} L_t T_p \quad (4)$$

, où T_p est la transpiration potentielle [$L T^{-1}$], L_z profondeur de la zone racinaire et L_x largeur de la zone racinaire à la surface associée au processus de transpiration. L'équation précédente peut être généralisée en introduisant une distribution non uniforme de prélèvement d'eau par la plante pour une zone racinaire de forme arbitraire (Vogel, 1987) :

$$S_p = b(x,z) L_t T_p \quad (5)$$

, où $b(x,z)$ est la distribution normalisée du prélèvements [L^{-2}]. Cette fonction décrit la variabilité spatiale du terme d'extraction potentielle, S_p sur la zone racinaire et est déduit de $b'(x,z)$ selon :

$$b(x,z) = \frac{b'(x,z)}{\int_{\Omega_R} b'(x,z) d\Omega} \quad (6)$$

, où Ω_R est région occupée par la zone racinaire et $b'(x,z)$ une fonction définie arbitrairement. La distribution des prélèvements est normalisée de sorte que sur le domaine :

$$\int_{\Omega_R} b(x,z) d\Omega = 1 \quad (7)$$

A partir de (5) et (7) il découle que S_p est relié à T_p par l'expression:

$$\frac{1}{L_t} \int_{\Omega_R} S_p d\Omega = T_p \quad (8)$$

La distribution réelle de la consommation est obtenue à partir des équations (5) et (3) :

$$S(h,x,z) = a(h,x,z) b(x,z) L_t T_p \quad (9)$$

, tandis que la transpiration réelle, T_r est obtenue par intégration de (5.2.9) :

$$T_r = \frac{1}{L_t} \int_{\Omega_R} S d\Omega = T_p \int_{\Omega_R} a(h,x,z) b(x,z) d\Omega \quad (10)$$

Il convient de noter que l'extraction racinaire peut être considérée négligeable lors de la simulation d'un essai d'infiltration de quelques heures à peine. Cela n'est bien évidemment plus acceptable lorsqu'on s'intéresse au phénomène de redistribution sur un minimum de 24 heures par exemple.

3 Les fonctions caractéristiques du milieu poreux non saturé

Les propriétés hydrodynamiques du milieu non saturé utilisées dans HYDRUS-2D font référence au modèle de Van Genuchten (1980) utilisant la distribution statistique des pores du modèle de Mualem (1976) pour obtenir une forme prédictive de l'équation de la conductivité hydraulique. L'expression de la courbe de rétention $h(\theta)$ est celle proposée par Van Genuchten (1980):

:

$$\mathcal{G}(h) = \mathcal{G}_r + \frac{\mathcal{G}_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m}, \quad (3.1)$$

avec $\theta = \theta_s$ pour $h \geq 0$

La conductivité hydraulique $K(h)$ est obtenue au moyen des équations:

$$\begin{aligned} K(h) &= K_s K_r(h) & h < 0 \\ K(h) &= K_s & h \geq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

, où:

$$K_r = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3.3)$$

, avec :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.4)$$

4. Conditions initiales et aux limites

La résolution de l'équation (2.1) requiert la connaissance de la distribution de h sur l'ensemble du domaine Ω :

$$h(x,z,t) = h_0(x,z,t) \quad \text{pour } t = 0 \quad (4.1)$$

le modèle traite 3 types de conditions aux limites: la condition de charge appelée aussi condition de Dirichlet :

$$h(x,y,t) = \psi(x,z,t) \quad \text{pour } (x,z) \in \Gamma_D \quad (4.2)$$

, la condition de flux (condition de Newman):

$$-\left[K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] n_i = \sigma_1(x,y,t) \quad \text{pour } (x,z) \in \Gamma_N \quad (4.3)$$

et enfin une condition à la limite avec gradient de charge:

$$-\left[K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right] n_i = \sigma_2(x,y,t) \quad \text{pour } (x,z) \in \Gamma_G \quad (4.4)$$

Les symboles Γ_D Γ_N Γ_G se réfèrent aux segments du domaine où s'appliquent respectivement les conditions de Dirichlet, Newman et de gradient. Les expressions ψ [L], σ_1 [LT⁻¹], σ_2 [-] sont fonction de x,z,t et n_i sont les composantes des vecteurs unitaires normaux aux limites du domaine Γ_N ou Γ_G . La condition de gradient s'applique en terme de gradient hydraulique vertical pour simuler le drainage libre à la base du profil loin de toute influence hydraulique due à la présence éventuelle d'une nappe.

En complément du système définissant les conditions aux limites indépendantes régi par les équations (4.2), (4.3) et (4.4), le modèle considère 3 types de conditions aux limites dépendantes ne pouvant être définies a priori. L'une d'entre elles met en jeu les interfaces sol-air soumises aux conditions atmosphériques. Le potentiel de flux au travers de ces surfaces est exclusivement contrôlé

par des conditions externes. Cependant, le flux réel (ETR) dépend des conditions d'humidité du sol. Notons au passage que les conditions à la surface du sol peuvent s'inverser (condition de charge à condition de flux). En l'absence d'infiltration sous conditions de charge (submersion) la solution numérique de (2.1) s'obtient en limitant la valeur absolue du flux de sorte que la condition suivante soit satisfaite (Newman et al, 1974) :

$$\left| K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A)n_i \right| \leq E \quad (4.5)$$

$$h_A \leq h \leq h_s \quad (4.6)$$

où E est le régime d'infiltration ou d'évaporation maximal sous les conditions atmosphériques actuelles, h est la charge (ou tension) à la surface du sol et h_A et h_s sont respectivement les tensions minimales et maximales autorisées sous les conditions prévalant à la surface du sol. La valeur de h_A est déterminée à partir des conditions d'équilibre en eau du sol et de vapeur d'eau atmosphérique tandis que h_s est généralement fixée à zéro.

Un deuxième type de conditions aux limites pris en compte par le modèle concerne les surfaces affectées par le transfert de l'eau en sortie du domaine saturé. La longueur de ce domaine affectée par le mouvement de l'eau n'est pas connue a priori, le modèle impose une charge uniforme toujours égale à zéro le long de ce domaine.

Enfin une troisième classe de conditions aux limites est relative à la présence d'un drain le long duquel une charge nulle est affectée tant que celui ci opère en milieu saturé. Un rôle de puits est ainsi affecté au drain. Ce dernier peut cependant se comporter comme un noeud puits/source du domaine avec recharge nulle lorsqu'il se trouve dans la zone non saturée.

5. Le principe de la méthode aux éléments finis

La méthode numérique de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles utilise la méthode des éléments finis de Galerkin. La description de cette méthode est proposée en détail par Newman (1975), Zienkiewicz (1977), Pinder et Gray (1977). Elle sort quelque peu du cadre de ce travail c'est pourquoi nous n'en donnerons qu'une brève explication du principe.

La technique des éléments finis consiste à remplacer la formulation différentielle par une formulation intégrale. On recherche alors une solution approchée du nouveau problème en un nombre finis de points du domaine.

Le domaine est d'abord transformé en un réseau d'éléments triangulaires, de telle sorte que chaque sommet (appelés points nodaux) soit un sommet de chacun des éléments qui l'entourent. La valeur de la variable recherchée en l'occurrence la pression h à l'intérieur de chaque élément est approchée au moyen d'un polynôme d'interpolation :

$$h'(x, z, t) = \sum_{n=1}^N \phi_n(x, z) h_n(t) \quad (5.1)$$

des valeurs de la fonction aux noeuds. Les fonctions linéaires ϕ_n devant satisfaire la condition $\phi_n(x_m, z_m) = \delta_{nm}$, h_n étant des inconnues solutions de (5.1) aux points nodaux, N étant le nombre de nombre de noeuds.

La formulation différentielle est ensuite transformée en formulation intégrale. La méthode de Galerkin postule que l'opérateur différentiel associé à l'équation de Richards est orthogonal à chacune des N fonctions de bases, i.e.,

$$\int_{\Omega} \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] + S \right\} \phi_n d\Omega = 0 \quad (5.2)$$

,les conditions aux limites imposant la nullité de l'intégrale de contour. La formule de Green appliquée à l'expression précédente après remplacement de h par h' conduit à une sommation d'intégrales calculées selon des techniques numériques appropriées sur le domaine Ω_e occupé par l'élément e ainsi que sur la frontière du segment de l'élément e . Après avoir fait choix d'hypothèses simplificatrices et réalisé l'intégration sur l'ensemble des éléments, la procédure conduit à un système d'équations différentielles ordinaires dépendant du temps à coefficients non linéaires. En forme matricielle ces équations sont données par :

$$[F] \frac{d\theta}{dt} + [A]\{h\} = \{Q\} - \{B\} - \{D\} \quad (5.3)$$

6. Application du modèle HYDRUS-2D au cas d'un sol limoneux à Lavalette

6.1 Les conditions initiales et aux limites

Le domaine permettant d'appliquer la méthode de résolution des éléments finis au cas de l'infiltration sous tirant d'eau h_0 , avec ses conditions initiales aux limites sont représentés à la figure 6.1. Compte tenu de la symétrie du domaine seule une demi section de raie est représentée.

Comme en témoigne la figure 6.2, les conditions initiales avant arrosage peuvent être établies à partir d'un seul tube d'accès neutronique. On utilisera de préférence celui installé sur la ligne de culture puisqu'il nous permet de connaître l'humidité initiale du billon. Cependant, le modèle HYDRUS-2D s'initialise en tension et non en humidité. Cela n'est hélas la plupart du temps guère possible à partir des lectures directes des tensiomètres, étant donné qu'entre la cote $z = 0$ et $z = 70$ cm, ces derniers sont désamorçés ($|h| > 800$ cm). Nous procédons alors par inversion de l'équation de rétention présentée dans ce qui suit en nous autorisant à utiliser la formule au delà de son domaine d'ajustement. Sur l'exemple du 3^e arrosage les tensiomètres jusqu'à la profondeur 75 cm de profondeur sont désamorçés attestant que la potentiel matriciel est supérieur à 800 cm. Jusqu'à 1.20 m on peut dire que le sol est relativement sec puisque le potentiel matriciel atteint des valeurs voisines de 500 cm à 1.10 m, ce dernier ne chutant qu'à partir de 1.30 m où il atteint la valeur de 150 cm.

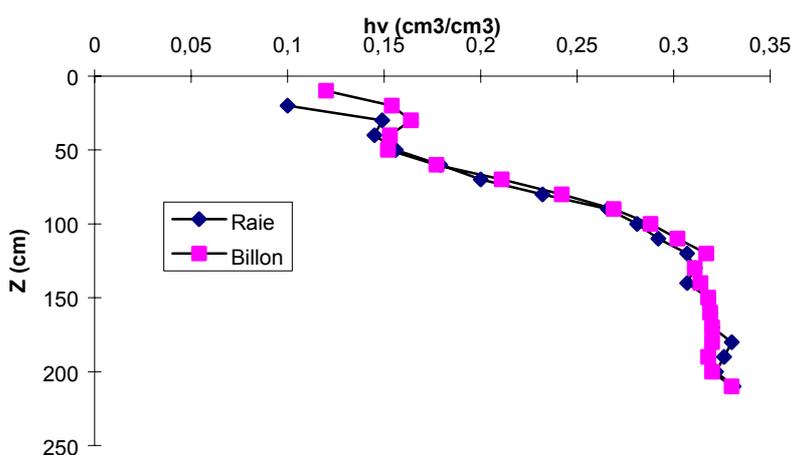


Figure 6.2. Profils d'humidité volumique au droit de la raie et du billon avant la 2^e irrigation (le zéro de l'échelle correspond au sommet du billon)

La figure 6.1 représente une demi raie ayant la forme trapézoïdale allure que l'on rencontre le plus fréquemment. Les pentes des cotés de la raie trapézoïdale ou fruit f peuvent varier de $1/1$ et $1/2$ (cas extrême). Nous analyserons entre autre l'impact que la géométrie peut avoir sur l'infiltration. Rappelons enfin que l'espacement entre raies est de 0.8 m. On notera un raffinement du maillage aux limites du domaine sujettes à de forts gradients de charge.

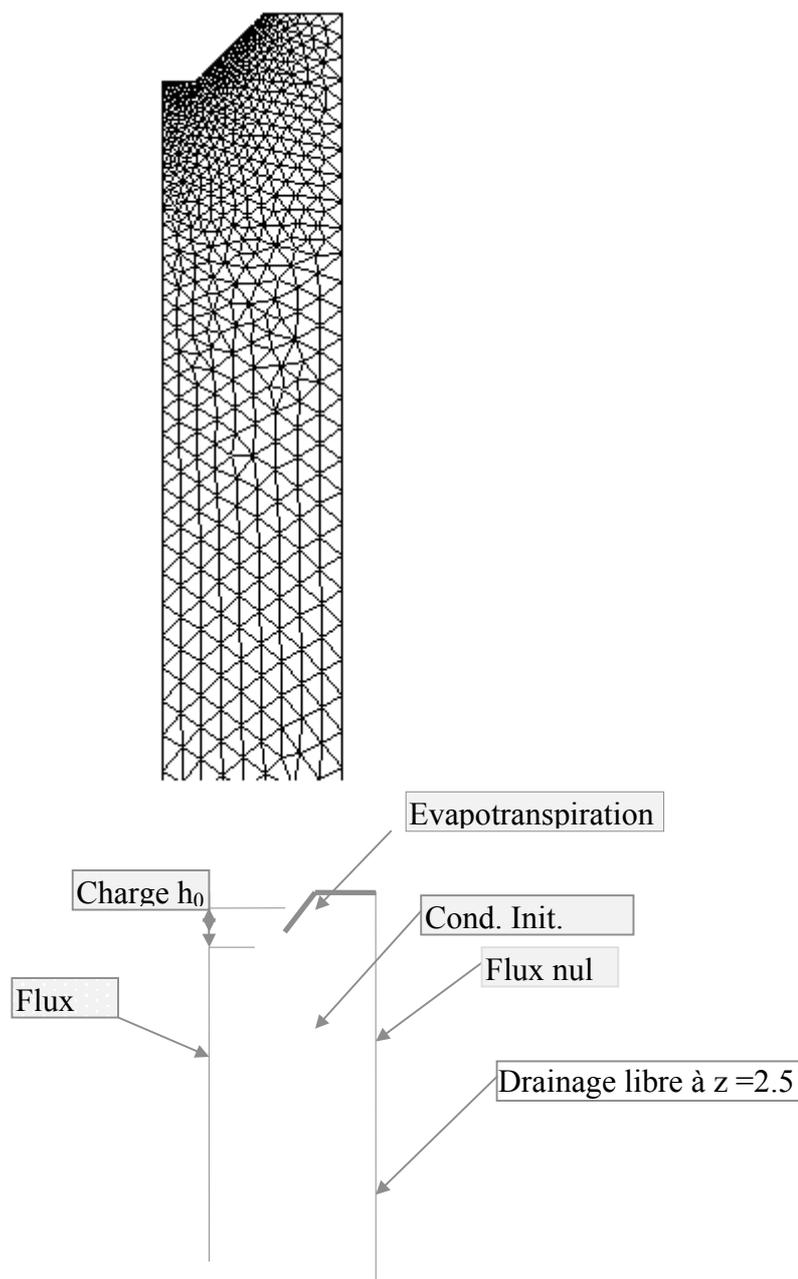


Figure 6.1. Maillage puis conditions initiales et aux limites permettant de simuler une infiltration dans une raie trapézoïdale. On notera le raffinement du maillage au frontières du domaine où existent de forts gradients de charge.

6.2 Les paramètres du modèle

Associée au modèle de Mualem ($m=1-1/n$) la courbe de rétention $h(\theta)$ est ajustée (algorithme d'optimisation de Rosenbrock) aux données du site moyen de Ta pour des cotes situées au delà de 15 cm. Avec les valeurs $\theta_s = 0.4$ et $\theta_r = 0$, proposées par Revol (1994), les valeurs de α et de n issues du calage sont respectivement 0.017 cm^{-1} et 1.387 avec un $R^2 = 0.889$. Avec $\theta_s = 0.38$ et $\theta_r = 0.05$, valeurs que l'on adopte au delà de la première irrigation en raison de l'effet de tassement du sol, on obtient des valeurs sensiblement différentes $\alpha = 0.015 \text{ cm}^{-1}$ et $n = 1.457$ avec $R^2 = 0.890$ (figure 1). Les valeurs de α et de n relatives à la couche 0-15 cm de l'essai de caractérisation sont respectivement 0.049 cm^{-1} et 1.292 (avec $m = 1-1/n$) avec un $R^2 = 0.955$ avec $\theta_s = 0.4$ et θ_r fixé à 0 d'après Revol.

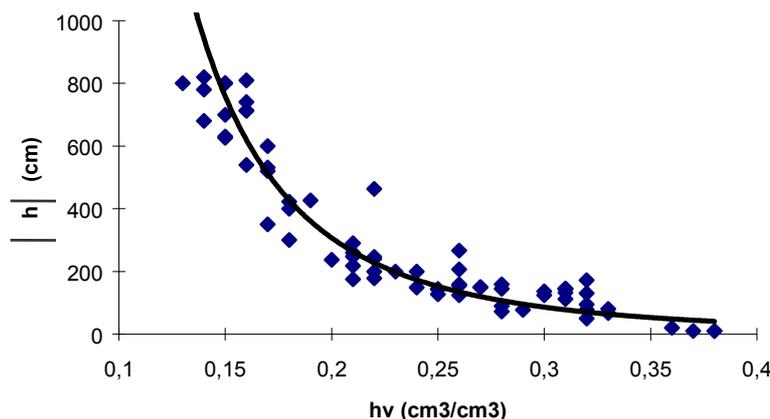


Figure 1.- Ajustement de la courbe de rétention selon la loi de Van Genuchten (avec $m=1-1/n$) aux couples $[h, \theta]$ du site moyen de Ta. ($z > 0.15$ m)

Les caractéristiques hydrodynamiques de la couche 0-15 cm, correspondant à l'horizon travaillé, seront affectées à la partie supérieure du billon (de l'ordre de 15 cm d'épaisseur) en apparence moins compactée que les couches situées en deçà du niveau correspondant au fond de la raie. Le profil textural du sol ne justifie pas que l'on différencie le sol en plusieurs couches en deçà du niveau horizontal correspondant au fond de la raie étant donné que le changement de la granulométrie ne se perçoit qu'au delà d'une profondeur susceptible d'influer très significativement l'infiltration lors des irrigations.

En raison d'un nombre de couples (h, θ) peu important et de l'imprécision relative au calage de la courbe de rétention, nous n'avons pas jugé utile d'essayer de caler un jeu différent de paramètres pour chaque irrigation. De même que nous n'avons pas cherché à réajuster ces paramètres au moyen de formules existant dans la littérature (celles de Vereecken et al., (1989) par exemple).

6.3. Application au cas du 3^e arrosage sur Lavalette en 1999

L'infiltration cumulée simulée à partir de la loi identifiée par RAIEOPT sur la raie moyenne encadrant les sites de mesures et celle simulée par HYDRUS-2D sont représentées à la figure 1.

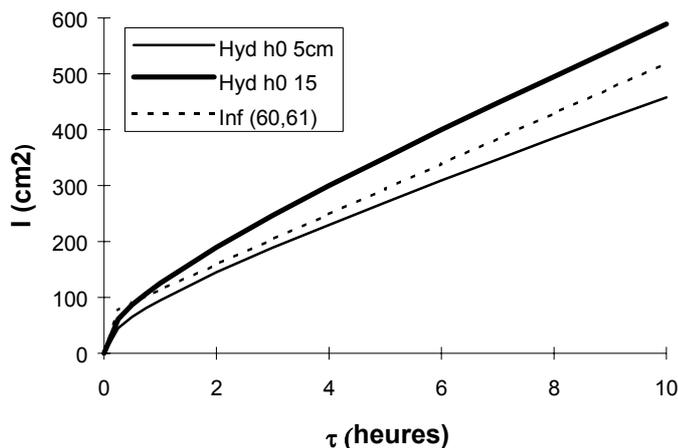


Figure 1. Infiltration simulée par Hydrus-2D (Hypothèse raie standard $f=1/1$) sous deux conditions de charge en surface ($h_0=5\text{ cm}$: site moyen, $h_0=10\text{ cm}$: site aval, avec $K_s=1.35\text{ cm/h}$) comparée à l'infiltration moyenne déduite des raies R60 et R61 par calage (du modèle RAIEOPT sur l'avancement du 3^e arrosage.

Le fait que le profil des teneurs en eau (figure 2) et celui des potentiels (figures 3 à 5) soient correctement simulés, témoigne de l'adéquation des caractéristiques hydrodynamiques adoptées. On constatera que les profils d'humidité mesurée au droit de la raie et du billon, représentés aux figures 4 et 5, témoignent d'une bonne redistribution de la dose apportée. On justifie là encore l'usage d'un seul tube pour établir les conditions initiales avant irrigation mais également le fait de pouvoir effectuer des bilans d'eau entre la surface du sol et l'enracinement maximal.

Notons que le profil de densité racinaire permettant de simuler les prélèvements par la plante (significatifs dans le cas de la redistribution) a été établi sur la base d'observations réalisées à partir d'une fosse creusée à la pelle mécanique en 1998 sur la même parcelle.

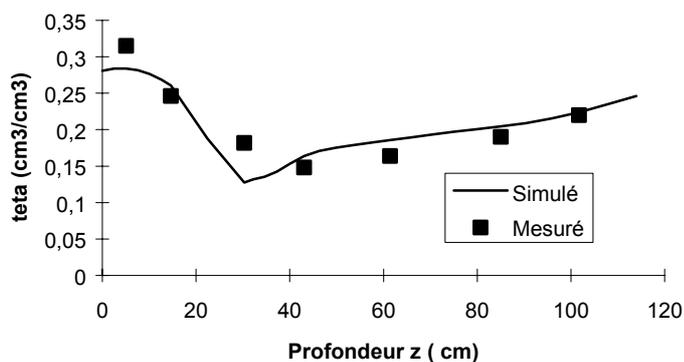


Figure 2. Profil de redistribution sous la raie 5 heures après la fin du 3^e arrosage au site moyen de Ta.

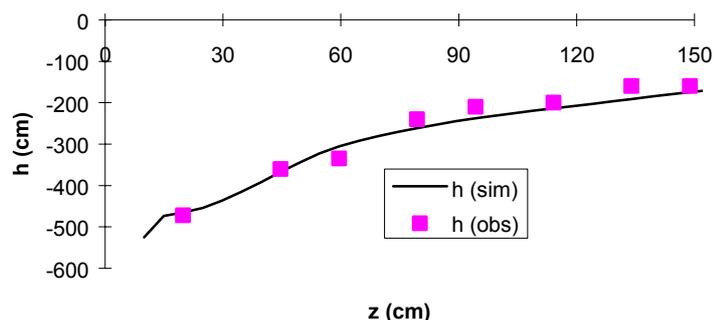


Figure 3. Profil du potentiel matriciel h (cm) le 3 Août (soit 13 jours après le 2^e arrosage)

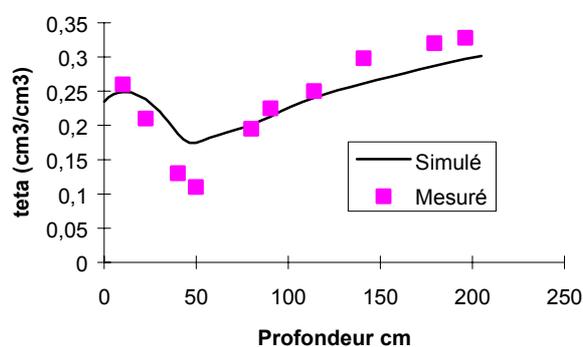


Figure 4. Profil d'humidité volumique sous la raie 6 jours après le 3^e arrosage sur Ta (pluie de 12 mm le 4^e jour)

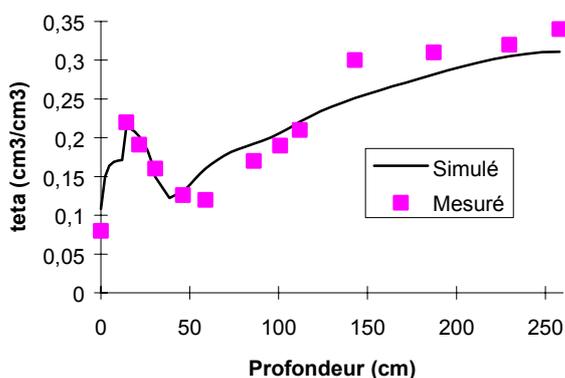


Figure 5. Profil d'humidité volumique sous le billon 6 jours après le 3^e arrosage sur Ta (pluie de 12 mm le 4^e jour)

On peut constater que l'infiltration cumulée simulée par HYDRUS-2D est de l'ordre de 360 cm² soit 90 mm (espacement 0.8 m infiltration dans une 1/2 raie) sous le tirant d'eau maximal $h_0 = 10$ cm. La durée de simulation en condition de charge variable en surface est de 6 h. Ce temps est de l'ordre de grandeur du temps d'opportunité moyen du site aval de Ta lors du 3^e arrosage en 1999. Pour justifier le choix d'une telle condition de charge maximale en surface, on peut signaler que le tirant d'eau mesuré à l'aval des raies les plus rapides atteignent la limite de débordement soit 15 cm et ce, avant que l'on ne coupe l'alimentation.

Cette valeur de l'infiltration est en accord avec les valeurs proposées par RAIEOPT et le modèle hydrodynamique SIRMOD. La valeur de l'infiltration cumulée avec $h_0 = 5$ cm pour un temps d'opportunité de l'ordre de 115 mn, conditions correspondantes à celles du site moyen du traitement Ta, est de 35 mm. Cette valeur est sensiblement plus faible que celle simulée par RAIEOPT en ce même site. On remarque qu'il faut accroître de 17% la valeur de K_s (2^e couche) pour faire en sorte que l'infiltration simulée par HYDRUS-2D coïncide parfaitement avec celle simulée par la loi d'infiltration de RAIEOPT au delà toutefois de 45'. La dose moyenne apportée lors de ce 3^e arrosage est de 54 mm.

L'absence de fissures à la surface du sol liée à une faible teneur en argile n'exclue cependant pas l'existence de macro-pores dans les couches sous-jacentes (Larson, 1999), le modèle basé sur le modèle de Richards simulant quant à lui l'infiltration dans la micro-porosité. Même avec une valeur de K_s résultant d'une méthode indirecte d'identification globale, intégrant du fait, à la fois macro et micro-porosité, le modèle basé sur l'hypothèse d'un milieu rigide continu à flux Darcien pourrait donc sous estimer, pour les temps courts, l'infiltration cumulée même en sol limoneux.

La simulation effectuée sur une durée importante (12 h) semble cependant valider à la fois le caractère prédictif et l'adéquation du modèle d'infiltration adopté pour notre contexte limoneux.

7. Analyse des facteurs susceptibles d'influencer l'infiltration dans une section de raie

L'intérêt du modèle numérique est de pouvoir tester l'impact de facteurs pouvant être sources de variabilité pour l'infiltration comme le périmètre mouillé ou la géométrie de la raie. Le débit, du fait de l'infiltration, diminue de l'amont vers l'aval. Il en résulte une diminution du périmètre mouillé et par voie de conséquence de l'infiltration. Le fait de pouvoir apprécier l'importance de cette diminution nous paraît intéressante.

La géométrie est imposée par la forme de l'outil et les conditions de travail du sol. Au contact d'un horizon compacté le soc se soulève avec pour conséquence une section plus étroite avec de pentes latérales élevées. Au contraire, au contact d'un horizon moins compact le soc engendre une raie de section plus évasée et la largeur au fond L_f assignée à 10 cm pour la raie standard, peut dépasser 15 cm. Généralement une réduction de la section d'écoulement s'accompagne d'un accroissement local de la pente et a donc peu d'impact sur le tirant d'eau comme le confirment les simulations faites au moyen de l'équation de Maning-Strikler ($h_0 = 4.5$ cm avec $L_f = 15$ cm, $S_0 = 0.2\%$; $h_0 = 4.58$ cm avec $L_f = 10$ cm, $S_0 = 0.4\%$). La section de raie est enfin sujette aux processus érosifs essentiellement localisés en partie amont de la parcelle et évolue plus ou moins selon la texture, surtout entre le premier et le deuxième arrosage. La figure 1 donne un aperçu de quelques formes possibles de sections de raie établies en fin de campagne.

7.1. Impact du tirant d'eau pour une géométrie de raie donnée

Le rapport des infiltrations cumulées évolue de 1.35 à 1.4 valeur à laquelle il se stabilise dès la première heure entre infiltration sous tirant d'eau de 5 cm et 10 cm. Il convient de noter que cette valeur n'est certes pas généralisable à tous les types de sols en raison du rôle joué par la capillarité et que les simulations effectuées sous les conditions de charges respectives de 5 et 10 cm n'ont pas de sens en dehors du contexte de la raie bouchée. A cet égard, dans le cas d'un arrosage avec colatures une telle situation ne pourrait se produire que si le débit était susceptible de varier de l'ordre de 1 à 5 L/s donnant lieu à un rapport des périmètres mouillés de 1.65 dans notre contexte de pente $S_0 = 0.25\%$. (Cf équation de Maning-Strikler).

Cette situation est somme toute assez éloignée des pratiques courantes. Il peut être cependant assez fréquent d'observer un débit aval moitié du débit amont en phase stabilisée. Entre ces points extrêmes le rapport des périmètres mouillés (P_{m2}/P_{m1}) serait de 1.25 pour un fruit $f = 1/2$ de la section trapézoïdale et de 1.28 pour $f = 1/1$. En appliquant la correction empirique déduite du résultat de la simulation représentée à la figure 2 :

$$I_2 = I_1 (P_{m2}/P_{m1})^{2/3} \quad (1)$$

, la correction qu'il conviendrait d'apporter pour prendre en compte la variation du périmètre mouillé entre les points extrêmes de la raie serait de 1.16. et de 1.18 respectivement pour $f = 1/2$ et

$f=1/1$. Cette correction concernant les points extrêmes de la raie n'est pas tout à fait négligeable. Son intérêt peut cependant paraître secondaire eu égard aux autres sources de variabilité non identifiables sur le parcours de l'eau.

7.2. Impact de la géométrie de la section de raie

L'ajustement d'une raie médiane paraît assez proche de la raie standard trapézoïdale pré-définie dans RAIEOPT. La largeur au fond de la raie médiane est en effet de 10 cm quand sa largeur maximale au niveau supérieur du billon est de l'ordre de 40 cm. Elle est quelque peu dissymétrique, la pente d'un des côtés (ou fruit f) étant proche de $\frac{1}{2}$ l'autre de $1/1$. Notons que des formes semi-circulaires peuvent également être observées.

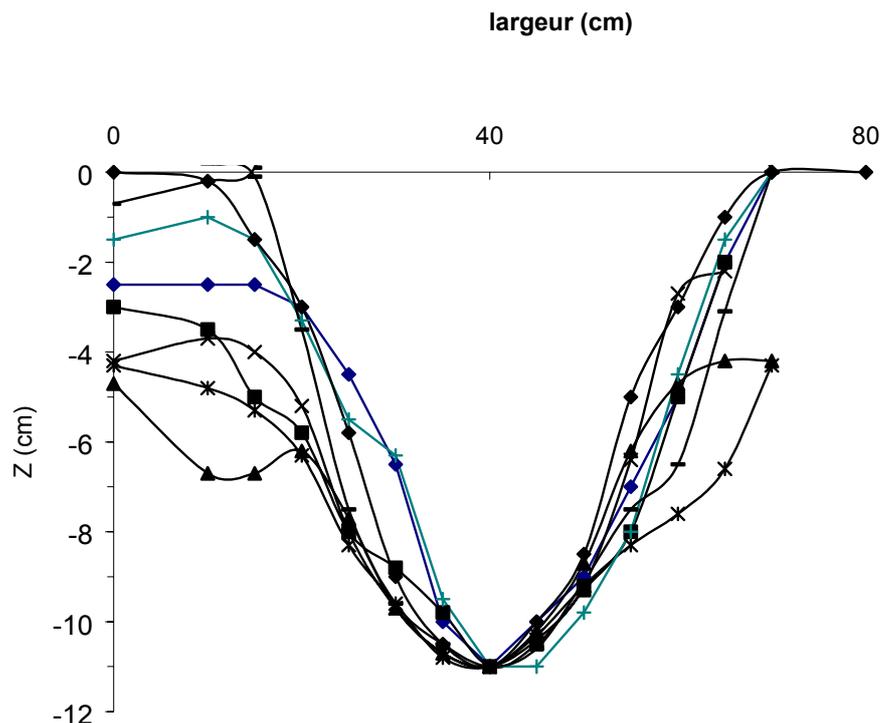


Figure 1 Sections mesurées sur 3 raies encadrant le site moyen, le fond de la raie étant pris comme origine.

Comme on peut le constater au regard de la figure 2, l'impact du fruit f de la raie trapézoïdale sur l'infiltration est faible voire négligeable. A tirant d'eau (h_0) égal, $I(f=1/1)$ est supérieure à $I(f=1/2)$ aux temps courts ($t < 3h$). Cette tendance s'inverse aux temps longs en raison de la diminution des effets capillaires vis à vis des effets dus à la gravité.

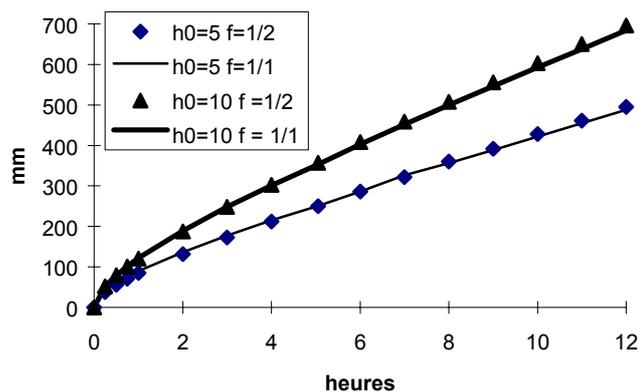


Figure 2- Impact de la forme de la raie (fruit f de la section trapézoïdale) et du tirant d'eau sur l'infiltration cumulée

L'infiltration cumulée est significativement plus élevée dans le cas de la raie semi-circulaire schématisée à la figure 3 où l'on note une valeur de 168 cm^2 (soit: 42 mm) pour 2 heures d'infiltration dans le contexte du 3^e arrosage (figure 4). Le fait que le cumul de l'effet capillaire et gravitationnel affecte une longueur plus importante du périmètre mouillé paraît être une explication valable de ce phénomène semble-t-il corroboré par l'extension latérale du bulbe (figure 5). On note de même un accroissement de l'ordre de 17% de l'infiltration cumulée lorsque la largeur au fond L_f de la raie trapézoïdale passe de 10 à 15 cm pour un même tirant d'eau de 5 cm. L'hypothèse selon laquelle le tirant d'eau demeure constant est somme toute forte si l'on admet que la pente demeure sensiblement constante. Le tirant d'eau diminue dans ce cas de 1 cm lorsque L_f passe de 10 à 15 cm avec pour conséquence un accroissement du rapport d'infiltration inférieur aux 17% proposés précédemment. Cet accroissement est évidemment à relier à l'importance du rapport gravité/capillarité pour le sol considéré.

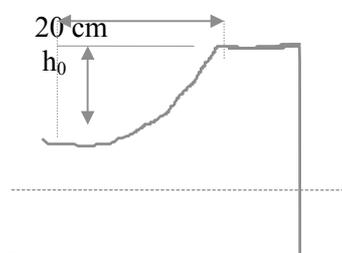


Figure 3. Schéma de la raie semi-circulaire

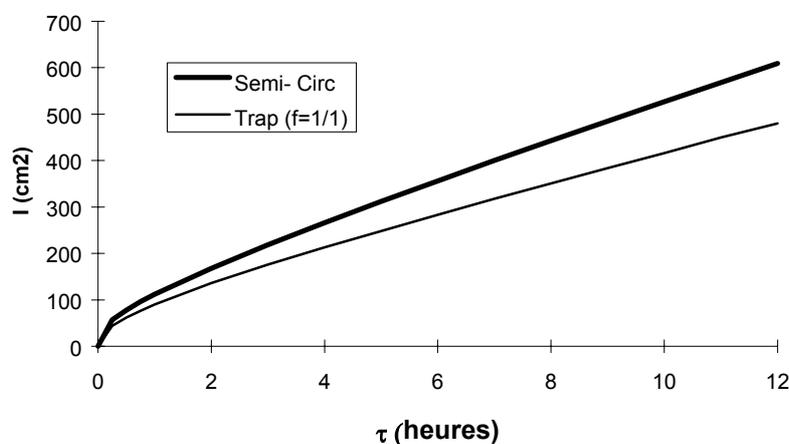


Figure 4. Impact de la forme de la raie: raie trapézoïdale / raie semi-circulaire ($h_0=7\text{cm}$)

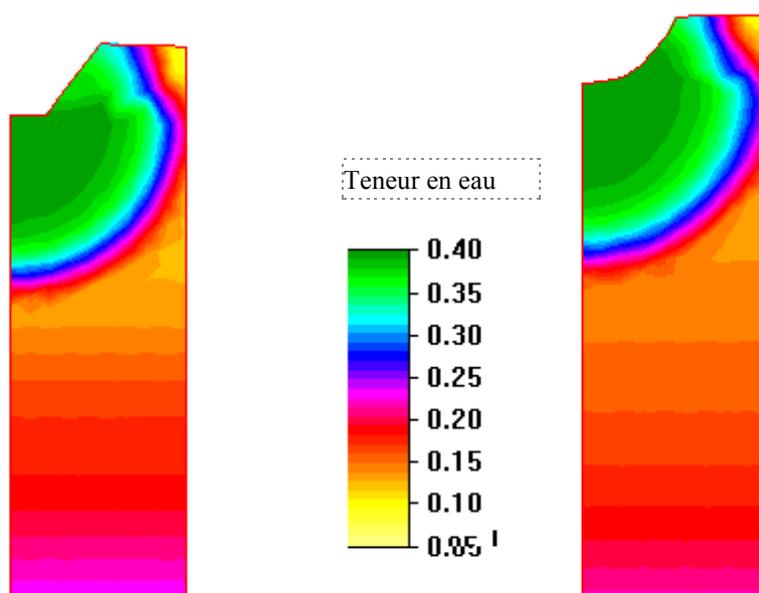


Figure 5. Simulation d'une infiltration en deux sections de géométrie différentes ($h_0 = 7$ cm ; $t_{co} = 6$ h)

Au regard de la figure 5 on constate qu'un temps d'opportunité τ de l'ordre de 6 heures est nécessaire pour que le "bulbe humide" avoisine la verticale de la ligne de culture (centre du billon). Dans le cas de la raie semi-circulaire sous $h_0 = 7$ cm, une dose de 85 mm aura alors été délivrée. Un temps d'opportunité de 2 heures permet, sous $h_0 = 5$ cm, d'apporter une dose de l'ordre de 35 à 40 mm selon la géométrie de la raie avec une extension latérale de la zone humide toutefois limitée au quart de l'inter - rang soit à peu près 20 cm. A $\tau = 2$ h, on constate qu'il est difficile de détecter un quelconque changement d'humidité à l'aide de la sonde à neutrons.

7.3 Impact des conditions initiales

La quasi totalité des solutions analytiques ou semi-analytiques de l'infiltration reposent sur l'hypothèse d'un profil d'humidité initiale homogène. Dans le cas de l'irrigation à la raie cette hypothèse est assez forte comme le souligne Berthomé (1991). On peut illustrer cela sur le cas de la 2^e irrigation de notre traitement Ta (figure 1) en raison d'une exploitation racinaire limitée à la date du 22 Juillet aux 60 premiers cm de sol. On peut par contre constater au regard du cas traitant des conditions initiales de la 3^e irrigation que l'hypothèse d'un profil uniforme est d'avantage soutenable. Les racines au 25 Août atteignant 1.20 m contribuent à une bien meilleure homogénéisation du profil sur la profondeur considérée.

Nous utilisons le modèle numérique afin de tester l'impact des conditions initiales d'humidité et plus précisément pour apprécier l'erreur que l'on commet sur l'infiltration lorsque l'on suppose que les conditions initiales sont homogènes. Il est en outre intéressant d'identifier le seuil d'hétérogénéité admissible et en particulier de pouvoir proposer une méthode permettant d'initialiser le profil à la valeur minimisant l'erreur de simulation de l'infiltration cumulée.

Par soucis de simplification nous considérons le cas d'un sol mono-couche. C'est à dire que l'on ne distingue pas les conditions d'infiltration dans la partie haute du billon du reste du profil. Les caractéristiques du sol sont donc les suivantes : $\theta_s = 0.38$, $\theta_r = 0.05$, $\alpha = 0.015$, $n = 1.457$, $m = 0.314$, $K_s = 1.4$ cm/h. Le test est effectué sous une condition de charge en surface $h_0 = 5$ cm qui est le tirant d'eau moyen mesuré en dehors de la zone influencée par l'endiguement aval.

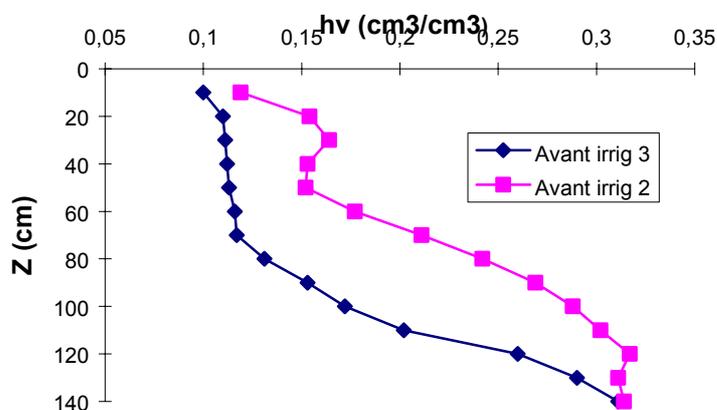


Figure 1. Allure des profils d'humidité avant 2^e et 3^e arrosage au site moyen (l'origine $z = 0$ est prise au sommet du billon)

On peut constater au regard de la figure 2, que l'écart entre infiltration établie sur la base d'un profil uniforme ($\bar{\theta}_i = \frac{1}{Z_x} \int_0^{Z_x} \theta(z) dz = 0.135$ cm³/cm³) et infiltration à partir des conditions initiales réelles, peut être considéré comme négligeable sur le cas du 3^e arrosage. On notera au passage que l'écart d'infiltration par rapport aux simulations basées sur un système type 2 couches (fig.2 fruit $f = 1/1$, $h_0 = 5$ cm) n'est pas manifeste.

Concernant le 2^e arrosage l'erreur est beaucoup plus importante puisque elle atteint en effet 10% quelle que soit la durée d'infiltration dans notre contexte limoneux. Cependant une erreur de 10% est souvent jugée acceptable pour ce qui est de l'estimation des doses en irrigation.

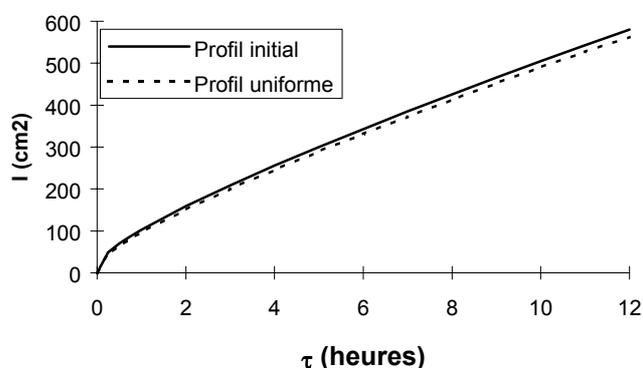


Figure 2. Test de l'hypothèse profil initial homogène ($\bar{\theta} = \frac{1}{Z_x} \int_0^{Z_x} \theta(z) dz = 0.135$) sur $Z_x = 1.2$ m sur l'exemple du site moyen: cas de la 3^e irrigation

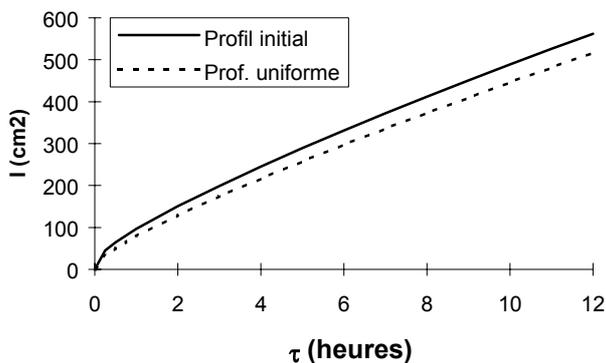


Figure 3. Test de l'hypothèse profil initial homogène ($\bar{\theta} = \frac{1}{Z_x} \int_0^{Z_x} \theta(z) dz = 0.204$) sur $Z_x = 1.2$ m sur l'exemple du site moyen: cas de la 2^e irrigation

La formulation moyenne $\theta_i = \bar{\theta} = \frac{1}{Z_x} \int_0^{Z_x} \theta(z) dz$ établie sur la profondeur maximale possible pour l'enracinement de la culture considérée (1.2 m pour le maïs) n'est pas toujours la mieux adaptée. Une formule du même type mais basée sur la pondération peut être proposée pour répondre au cas d'une hétérogénéité fortement marquée du profil initial. Les coefficients pondérateurs intervenant dans cette formulation seraient obtenus par minimisation d'un critère d'écart entre infiltration de référence (profil hétérogène) et infiltration en conditions initiales supposées homogènes.

B/ Le transfert de soluté appliqué au cas 2D de l'irrigation à la raie

1. L'équation régissant le transport de soluté

L'équation aux dérivées partielles régissant le transfert bidimensionnel des solutés en milieu poreux rigide non saturé est donné par l'expression :

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} + \mu_w \theta c + \mu_s \rho s + \gamma_w \theta + \gamma_s \rho S c_s \quad (1)$$

où c est la concentration [ML^{-3}] de la solution, s est la concentration adsorbée [-], q_i la i -ème composante du flux [LT^{-1}], μ_w and μ_s sont les constantes du premier ordre pour le soluté dans la phase liquide [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$] et solide [T^{-1}], respectivement; ρ est la densité sèche du sol [ML^{-3}], S le terme puits de l'équation (5.2.1) relative au transfert d'eau, c_s est la concentration du terme puits [ML^{-3}], D_{ij} le tenseur des coefficients de dispersion [L^2T^{-1}]. Les quatre constantes de zéro et de premier ordre peuvent être utilisées pour représenter une variété de réactions et de transformations incluant biodégradation, volatilisation, précipitation et dégradation radioactive.

Avant de résoudre l'équation de transport (1) la relation entre c et s doit être spécifiée. La littérature propose un certain nombre d'équations permettant de décrire de façon linéaire ou non l'équilibre d'adsorption. Dans la présente version du modèle, l'isotherme d'adsorption reliant s et c est décrite par la relation linéaire :

$$s = K_d c \quad (2)$$

où K_d est une constante empirique [L^3M^{-1}]. Ce modèle peut être considéré comme résultant de celui de Langmuir (1918):

$$s = \frac{ck_1}{(1 + ck_2)} \quad (3)$$

dans lequel on a considéré que le deuxième terme du dénominateur pouvait être négligé devant 1 en raison des faibles valeurs de concentration généralement observées dans les sols (Campbell, 1985) et de fait assigné k_1 à k_d .

L'équation de continuité suivante décrit l'écoulement isotherme de type Darcien dans un milieu poreux non saturé.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - S \quad (4)$$

En substituant (2) et (4) dans (1) on obtient,

$$- \theta R \frac{\partial c}{\partial t} - q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + Fc + G = 0 \quad (5)$$

où,

$$F = \mu_w \theta + \mu_s \rho k + S \quad (6)$$

$$G = \gamma_w \theta + \gamma_s \rho - S c_s$$

le facteur de retardement R [-] étant défini selon:

$$R = 1 + \frac{\rho k_d}{\theta} \quad (7)$$

A fin de résoudre l'équation (5) il est nécessaire de connaître la teneur en eau volumique θ et le flux q_r , ces deux variables étant déduites de la solution de l'équation de Richards.

2. Conditions initiales et aux limites

La solution de l'équation (5) requiert la connaissance de la concentration initiale au sein du domaine d'écoulement,

$$c(x,z,0) = c_i(x,z) \quad (2.1)$$

où c_i est une fonction pré-définie de x et z ou tout simplement le profil initial d'azote tel que nous l'avons obtenu, c'est à dire par prélèvement d'échantillons de sol à la tarière ensuite soumis au dosage de l'azote. On renseigne alors chacun des nœuds du domaine.

Deux types de conditions aux limites (Dirichlet et cauchy) peuvent être spécifiées le long des frontières du domaine. Le premier-type (Dirichlet) se réfère à la concentration le long d'un segment Γ_D :

$$c(x,z,t) = c_0(x,z,t) \quad \text{pour } (x,z) \in \Gamma_D \quad (2.2)$$

tandis que le troisième-type (Cauchy) de conditions à la limite peut être utilisé pour prescrire le flux de soluté le long d'un segment Γ_C :

$$- \theta D_g \frac{\partial c}{\partial x_j} n_i + q_i n_i c = q_i n_i c_0 \quad \text{pour } (x,y) \in \Gamma_C \quad (2.3)$$

équation dans laquelle $q_i n_i$ représente le flux de fluide extérieur, n_i étant le vecteur normal unitaire extérieur, et c_0 la concentration du fluide entrant. On retrouve là les conditions qui prévalent à l'application d'une irrigation fertilisante à la concentration c_0 . Dans certains cas, par exemple lorsque Γ_C est une frontière imperméable ($q_i n_i = 0$) ou que l'écoulement est dirigé hors du domaine, l'équation précédente se réduit à un second-type (de type Newman) de condition à la limite prenant l'expression:

$$- \theta D_g \frac{\partial c}{\partial x_j} n_i = 0 \quad \text{pour } (x,y) \in \Gamma_C \quad (2.4)$$

3. Le coefficient de dispersion

Les composantes du tenseur de dispersion, D_{ij} dans (3.1) sont données par (Bear, 1972) :

$$\theta D_{ij} = D_T |q| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{q_j q_i}{|q|} + \theta D_m \tau \delta_{ij} \quad (3.1)$$

où D_m est le coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau libre [$L^2 T^{-1}$], τ est un facteur de tortuosité [-], $|q|$ est la valeur absolue de la densité du flux Darcien [LT^{-1}], δ_{ij} est la fonction delta de Kronecker

($\delta_{ij}=1$ si $i=j$ et $\delta_{ij}=0$ si $i \neq j$), et D_L et D_T sont respectivement les dispersivités longitudinales et transversales [L]. Les composantes individuelles du tenseur de dispersion pour un transport de type 2D s'expriment selon:

$$\begin{aligned}\theta D_{xx} &= D_L \frac{q_x^2}{|q|} + D_T \frac{q_z^2}{|q|} + \theta D_m \tau \\ \theta D_{zz} &= D_L \frac{q_z^2}{|q|} + D_T \frac{q_x^2}{|q|} + \theta D_m \tau \\ \theta D_{xz} &= (D_L - D_T) \frac{q_x q_z}{|q|}\end{aligned}\quad (3.2)$$

Le facteur de tortuosité est évalué en fonction de la teneur en eau selon la relation de Millington et Quirk (1961) :

$$\tau = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (3.3)$$

4. Calage et validation des paramètres

On a choisi la deuxième irrigation du traitement Ta en gravitaire à Lavalette (1999) pour caler les paramètres du modèle HYDRUS-2D car elle se situe entre les deux prélèvements d'échantillon à savoir, celui du 20/7 et celui du 3/8. Au cours de cette période de 13 jours, la redistribution de l'eau, la consommation par la plante de l'eau et de l'azote sont simulées par le modèle. La consommation de l'eau est simulée selon l'approche de Feddes (Feddes et al., 1978) présentée au chapitre 5 après avoir assigné une valeur caractérisant la densité racinaire à chacun des noeuds appartenant au domaine colonisé par les racines. On affecte au terme de puits d'azote de l'équation de transport, une valeur de concentration de l'eau transpirée c_s tenant compte des potentialités d'utilisation de l'azote par la plante. Le calage va consister à faire en sorte que le profil d'azote simulé soit aussi proche que possible du profil d'azote mesuré le 3 Août.

A l'exception de la densité sèche en partie haute du billon, les paramètres sont supposés constants avec la profondeur. Le coefficient de diffusion moléculaire D_m est fixé à $1.55 \text{ cm}^2/\text{h}$ comme le proposent Beven et al., (1993). La dispersivité longitudinale (D_L) et transversale (D_T) sont dans un premier temps fixées respectivement à 10 et 2 cm comme dans Simunek et al., (1996) pour l'exemple de la raie. Les résultats en ce qui nous concerne semblent sensiblement meilleurs avec $D_L = 15$ et $D_T = 6$ cm. La valeur retenue pour D_L est proche de celle proposée par Beven et al., (1993) pour un sol ayant des caractéristiques fort similaires au notre. A noter cependant que ces paramètres affichent une faible sensibilité étant donné qu'une modification de 50% ou plus a des conséquences à peine perceptibles.

Le coefficient de partition isotherme K_d (L/kg) permettant de relier linéairement la concentration du soluté dans la solution du sol et dans les sites de sorption est nécessaire. La constante K_d en ce qui concerne l'ammonium est entre 0.3 et 3 L/kg (Vereecken et al., 1991), tandis que celle de NO_3^- est très faible (10^{-6} L/kg) car il n'est pas adsorbé sur la matrice poreuse. Quant aux 4 constantes d'ordre zéro et de premier-ordre, elles sont fixées à 0. Cela se justifie dans la mesure où les différentes transformations incluant biodégradation, volatilisation etc. peuvent être ignorées durant cette relative courte période.

Les valeurs retenues pour D_L et D_T avec une valeur globale concernant K_d de 7.510^{-4} L/kg (la concentration en NO_3^- est 5 à 10 fois supérieure à celle de l'ammonium) permettent de simuler de

façon acceptable (figures 1 et 2) le transfert d'azote durant la 2^{ème} irrigation sur le site aval de Ta en supposant que ce site a des conditions initiales comparables à celle du site Te. On peut constater que le modèle simule bien l'accroissement de concentration en partie haute du billon sous l'effet d'un gradient ascendant (flux d'évaporation) d'origine capillaire.

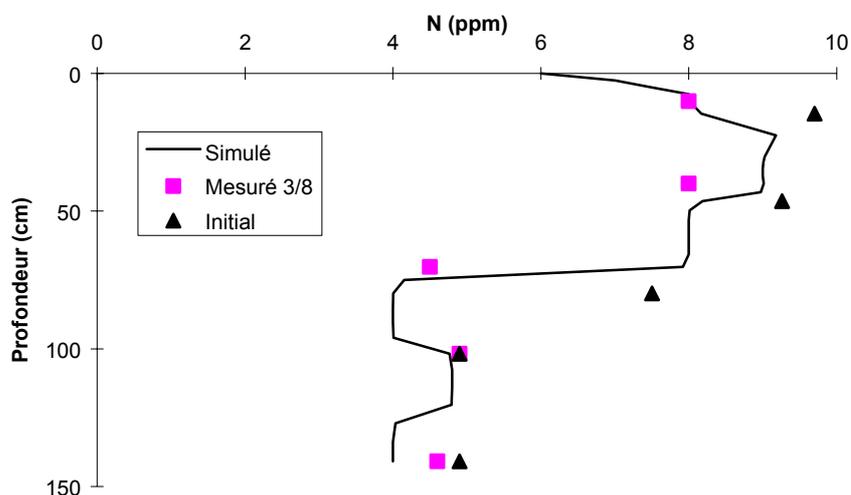


Figure 1. Profil d'azote sous la raie le 3/08 (13 jours après la 2^{ème} irrigation) sur le site aval de Ta

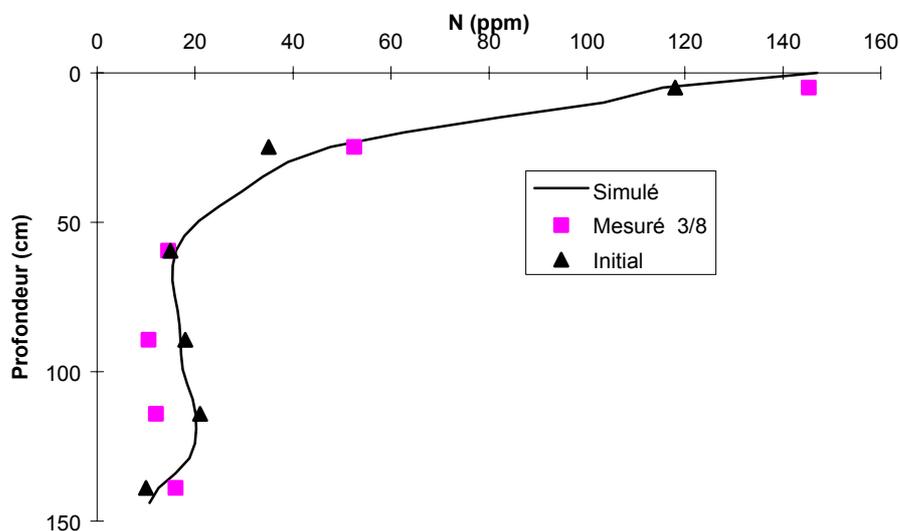


Figure 2. Profil d'azote sous le billon le 3/08 (13 jours après la 2^{ème} irrigation) sur le site aval de Ta

A titre de validation, nous nous proposons de réaliser une simulation entre les prélèvements du 26/8 et du 15/10. Compte tenu de l'intervalle de temps, il nous paraît cette fois préférable de tenir compte de la quantité d'azote minéralisée. Comme HYDRUS-2D ne la simule pas, nous l'estimons en nous référant à celle du traitement 0N de l'aspersion qui est de l'ordre de 1 kg/ha/jour durant cette

période (soit 0.33 ppm/j avec $ds = 1.5$ et une épaisseur de sol concernée de 20 cm). Cette valeur paraît conforme à celles de la littérature (Mary et Recous, 1994). Notons que le contexte de Lavalette où les températures moyennes du sol à 20 cm oscillent entre 20 et 28° durant l'été est favorable à une bonne minéralisation.

Au regard des figures 3 et 4 on constate que le modèle simule le transfert d'azote depuis la partie haute du billon vers les couches sous-jacentes sous l'effet des pluies (100 mm environ durant la période simulée).

Malgré l'application de doses conséquentes proches de 120 mm en extrémité de parcelle aucun lessivage d'azote n'est constaté. On peut ajouter qu'une quantité résiduelle d'azote, quoique plus faible que celle du site central en raison d'un tirant d'eau plus élevé, demeure encore stockée en partie haute du billon. Le modèle simule la libération de cette quantité résiduelle au profit des couches sous-jacentes à la faveur des précipitations d'Août à mi Octobre.

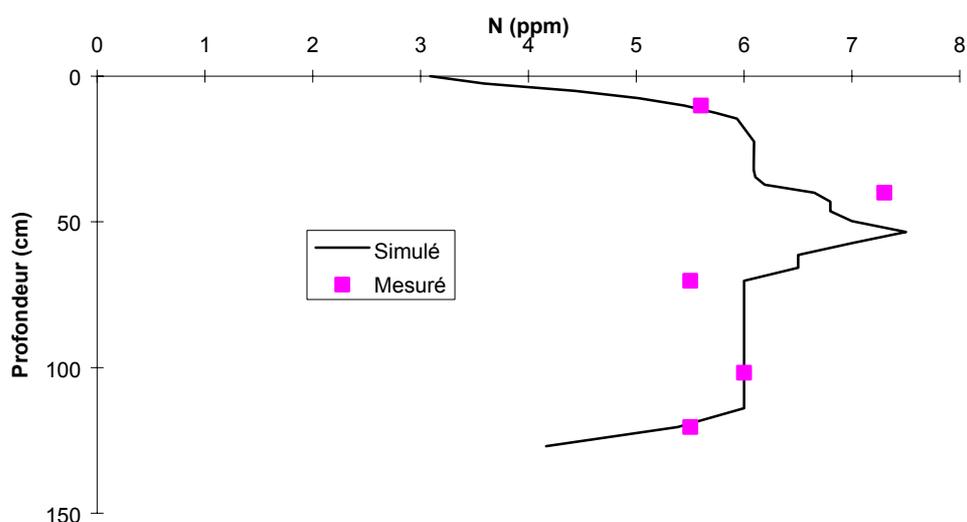


Figure 3. Test du modèle sur le profil d'azote mesuré le 15 /10 sous la raie au site central du traitement Ta.

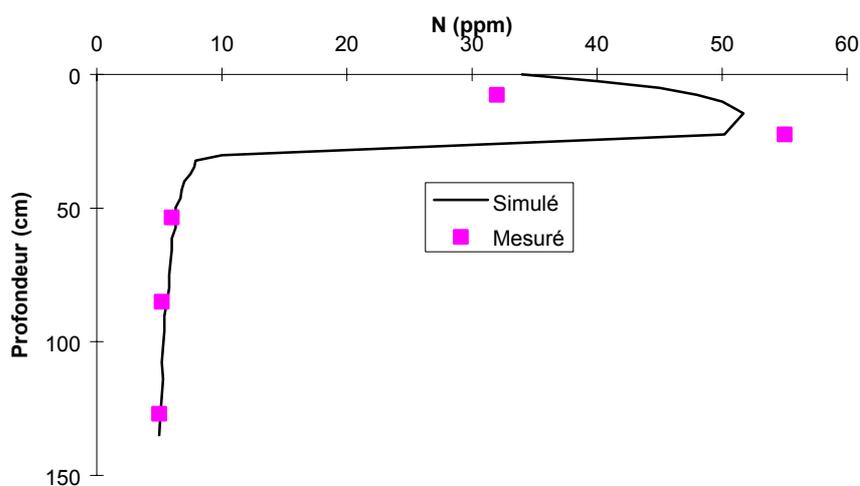


Figure 4. Test du modèle sur le profil d'azote mesuré le 15 /10 sous le billon au site central du traitement Ta.

5. Application du modèle Hydrus-2D aux conditions locales de doses d'irrigation extrêmes

Nous proposons d'utiliser de façon conjointe SOFIP et HYDRUS-2D pour analyser les situations localement extrêmes d'apports d'eau sur la parcelle de Lavalette sous les conditions climatiques de la campagne 1995 (année moyenne) et dans le cas de la conduite en raies bouchées. Les situations à risque relatives à l'excès de drainage simulées par SOFIP, ne concernent toutefois qu'une partie très limitée de la parcelle au regard du contexte simulé.

Le profil initial d'humidité est conforme à la pratique de l'agriculteur, basée sur un déclenchement de type fréquentiel (tous les 15 jours) de l'irrigation. Cette pratique donne lieu à 4 arrosages espacés respectivement de 15, 17 et 15 jours. La redistribution de l'eau et de l'azote sur la durée séparant deux arrosages tient compte de la consommation par la plante et de l'impact des pluies éventuelles. La concentration c_3 relative au terme puits d'azote est fixée à une valeur tenant compte des besoins en azote de la plante durant la période considérée. On s'autorise à ne pas tenir compte de la minéralisation durant cette période.

5.1. Doses modérées à faibles: en amont ou au milieu de la parcelle irriguée en raie bouchée.

Les doses minimales résultant de la simulation sont de l'ordre de la quarantaine de mm ($C_v(D_{min}) = 8\%$). Il convient pour cela de procéder à des durées de simulation de l'ordre de 2h (temps d'opportunité) ce qui ne nous éloigne guère du scénario de la parcelle de Lavalette en 99 concernant les parties les moins irriguées. L'application du modèle dans les conditions climatique, de 1995 à Lavalette, montre qu'un reliquat relativement important d'azote existe à la fin du premier arrosage (figure 1) mais également en fin de campagne d'irrigation sur la partie haute du billon dans les zones échappant à l'effet d'endiguement (figure 3). Cette situation est bien conforme aux observations réalisées sur les différents sites de la parcelle de Lavalette en 99, extérieurs à la zone fortement endiguée que constituent par le 10 derniers mètres aval. Cette zone extrême aval, n'avait hélas pas fait l'objet d'un suivi particulier seul, le constat d'un meilleur développement de la culture avait été établi, imputable à une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote par la plante.

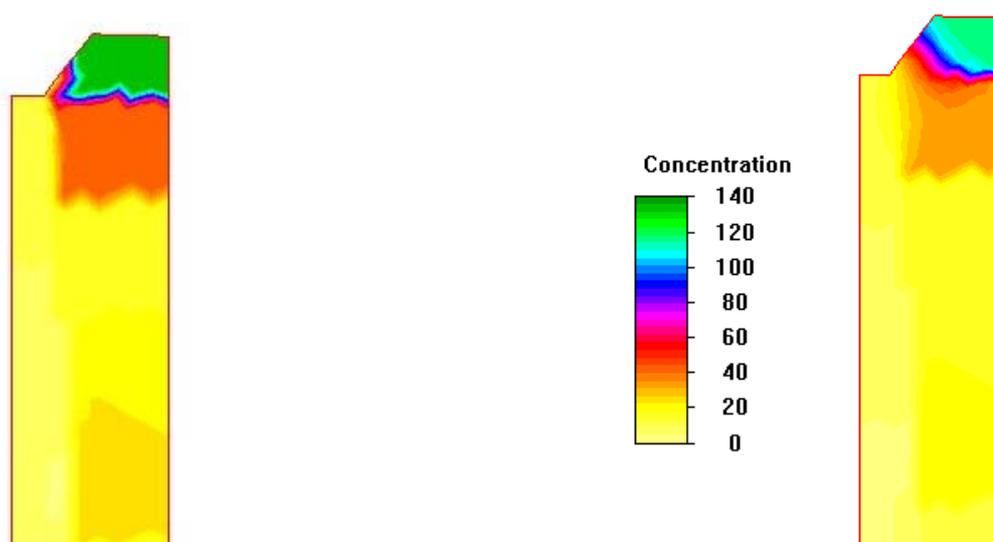


Figure 1. Répartition de l'azote (concentration en ppm) sur $z \approx 1.4$ m avant et après simulation d'un premier arrosage en un point extérieur à la zone endiguée ($h_0 = 5$ cm, $\tau = 2$ h)

5.2. Doses élevées: à l'extrémité aval des raies bouchées

Dans les conditions de régime élevé d'irrigation les doses localement infiltrées peuvent atteindre 160 mm au cours d'un arrosage. Le modèle RAIEOPT dans ce cas simule des tirants d'eau aval dépassant sensiblement 15 cm. Quant aux temps d'opportunité τ , ils peuvent dépasser 7 heures conformément à nos observations sur Lavalette et aux simulations de SIRMOD. En conséquence il nous paraît fort réaliste de procéder à une simulation de 6 heures avec $h_0 = 15$ cm, pour obtenir une infiltration de 125 mm. Avec une section de raie de 0.04 m^2 amenant une contribution de l'ordre de 40 L/m on est proche des 160 mm souhaités. Le régime d'infiltration sous condition de charge variable a été calqué sur celui observé à Lavalette.

Le modèle ne simule pas de pertes en nitrates en deçà de la zone racinaire lors d'un premier arrosage malgré une manifeste réorganisation du profil d'azote dans les 60 premiers cm de sol (figures 1 et 2.). Le profil simulé au droit du billon témoigne d'un transfert sensible de la couche 0 -15 cm vers la couche 20 -35 cm. On notera également un accroissement de concentration en soluté sur la partie haute du billon sous l'effet de l'évapotranspiration manifeste lors de la redistribution ($5 < \text{ETM} < 6 \text{ mm/j}$)

Le cumul des pertes par lessivage sous la zone racinaire après le 4^{ième} arrosage (figure 3 et 5) s'élèvent à 10 ppm seulement. Contrairement aux zones échappant à l'effet d'endiguement, on observe une quasi disparition de l'azote initialement stocké en partie haute du billon au profit des couches sous-jacentes. Le profil du sol sous la raie semble bénéficier de cette migration de l'azote comme en témoigne la figure 4. Au droit du billon, la tendance amorcée lors du premier arrosage s'est nettement confirmée, la couche 40 - 80 cm s'étant très significativement rechargée en azote (figure 5).

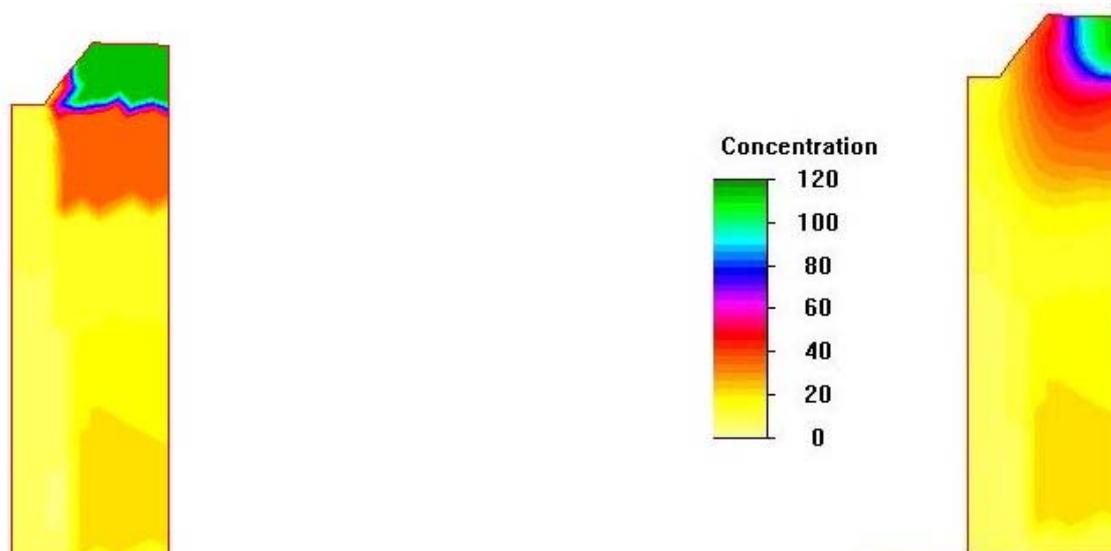


Figure 1. Répartition de l'azote (concentration en ppm) sur $z \cong 1.4$ m avant et après simulation d'un premier arrosage en aval d'une raie bouchée ($h_0 = 15$ cm, $\tau = 6$ h)

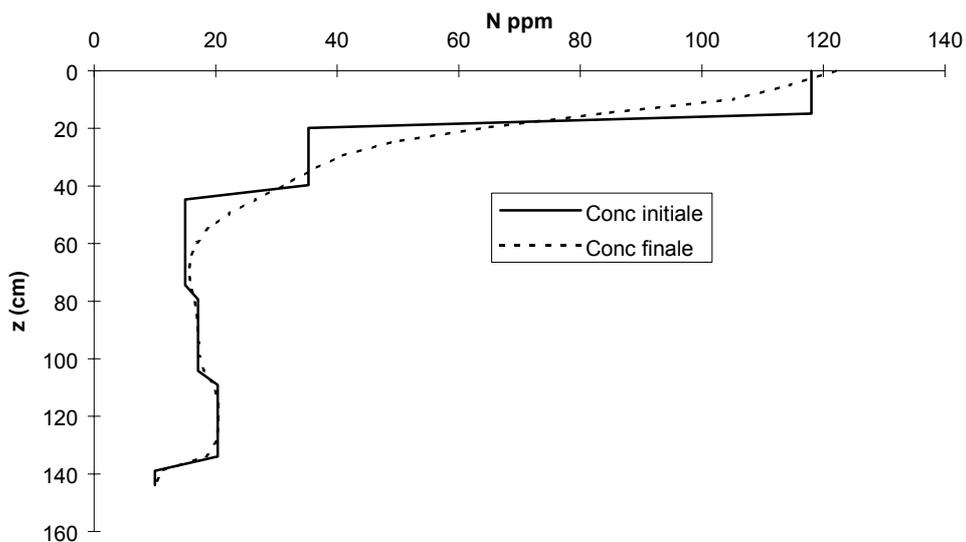


Figure 2. Profils d'azote sous le billon avant la première irrigation et 24 h après le premier arrosage simulé par Hydrus-2D.

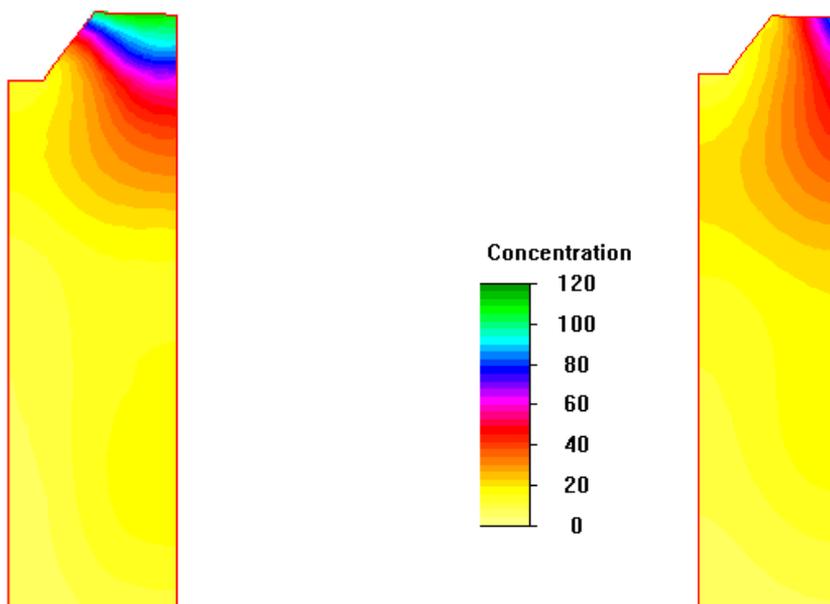


Figure 3. Répartition de l'azote (concentration en ppm) sur $z \cong 1.4$ m après simulation du 4^{ème} arrosage en un site amont (ou milieu) de parcelle ($h_0 = 5$ cm) et en site aval d'une raie bouchée ($h_0 = 15$ cm, $\tau = 6$ h)

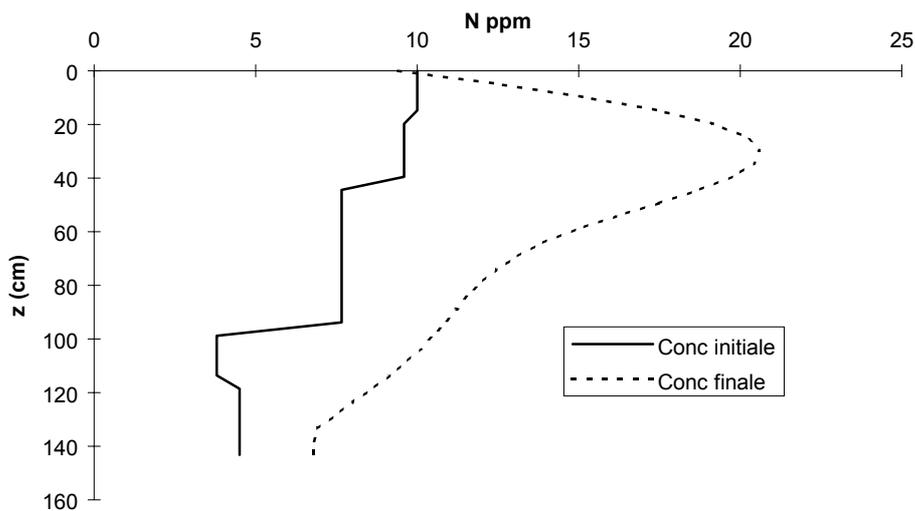


Figure 4. Profils d'azote sous la raie avant 1^{ière} irrigation et après simulation de la 4^{ième} et dernière irrigation.

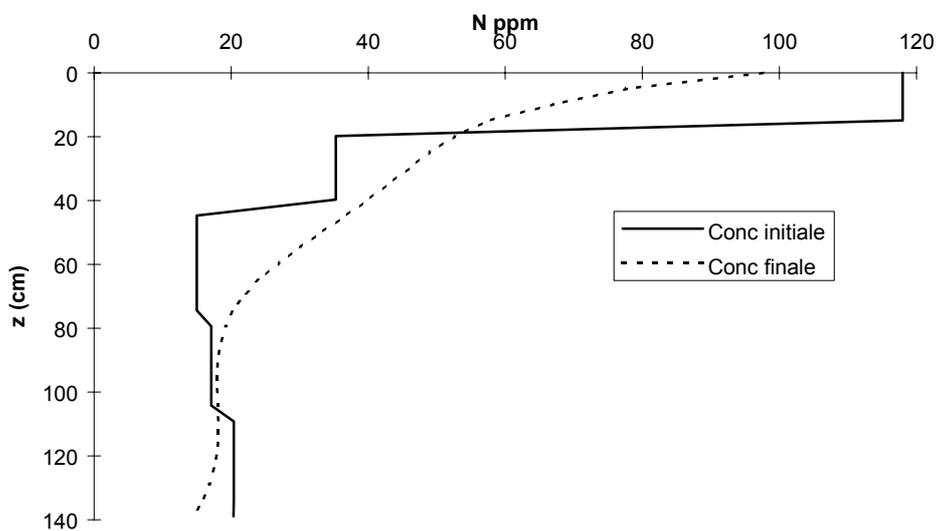


Figure 5. Profils d'azote sous le billon avant irrigation et après simulation du 4^{ième} arrosage

Annexe 3

Principaux articles

Maihlol, J.C., Gonzalez, J.M. (1993). Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering - ASCE* 119 (5) , 768-783

Maihlol, J.C., Baqri, M., Lachhab, M.(1997). Operative irrigation modelling for real-time applications on closed-end furrows. *Irrigation and Drainage Systems* 11 (4) , 347-366

Maihlol, J.C., Priol; M., Benali, M. (1999). A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. *Agricultural Water Management* 42 (1) , 65-80

DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00024-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00024-4)

Maihlol, J.C., Ruelle, P., & I. Nemeth (2001). Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science*, 20(3) : 139 – 147.

DOI : <http://dx.doi.org/10.1007/s002710100038>

Mailhol, J.C. 2003. Validation of a predictive form of Horton infiltration for simulating furrow irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 412-421

DOI : [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:6\(412\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:6(412))

Mailhol, J.C., Ruelle, P. , Popova, Z. SOFIP: A field-scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. *Irrigation Sciences* (submitted).
