

Une approche intégrée pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation gravitaire sur les risques environnementaux et la production

Jean-Claude Mailhol, Pierre Ruelle, Laurent Delage

► To cite this version:

Jean-Claude Mailhol, Pierre Ruelle, Laurent Delage. Une approche intégrée pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation gravitaire sur les risques environnementaux et la production. Serge Marlet, Pierre Ruelle. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation, 2001, Montpellier, France. Cirad - IRD - Cemagref, 10 p., 2003. <cirad-00180709>

HAL Id: cirad-00180709

<http://hal.cirad.fr/cirad-00180709>

Submitted on 19 Oct 2007

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.

Une approche intégrée pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation gravitaire sur les risques environnementaux et la production

Jean-Claude Mailhol*, Pierre Ruelle*, Laurent Delage*

* CEMAGREF, Unité de recherche Irrigation BP 5095, 34033 Montpellier, France

Résumé

Une approche intégrée pour analyser l'impact d'une pratique d'irrigation gravitaire sur les risques environnementaux et la production. En irrigation gravitaire, les sources d'hétérogénéité peuvent s'analyser à partir de leurs effets sur l'avancement de l'eau. Cette démarche est à l'origine d'une approche intégrée permettant de tester l'impact d'une pratique d'arrosage sur l'efficacité hydraulique et le rendement à l'échelle d'une parcelle irriguée à la raie. Cette approche intégrée utilise un générateur de paramètres qui fournit les grandeurs nécessaires au modèle d'irrigation. Ce dernier simule selon différents types de conduites d'arrosage le processus avancement-infiltration pour un ensemble de N raies d'une parcelle. Le générateur de paramètres assure en outre le couplage entre modèle d'irrigation et modèle de culture simulant le bilan hydrique et le rendement. L'approche a été validée sur une parcelle expérimentale de longueur 130 m à Lavalette (Cemagref Montpellier) en sol limoneux pour une culture de maïs. On montre alors sur la base d'un scénario climatique relatif à une année sèche qu'il est possible, pour ce même type de sol, d'irriguer une parcelle de 250 m (compatible avec l'investissement requis par un système de distribution type rampe à vanettes) avec une efficacité moyenne sur la saison proche de 80% en obtenant par ailleurs une valeur moyenne du rendement satisfaisante. L'outil développé permet donc d'identifier des pratiques d'irrigation efficaces, tant du point de vue hydraulique qu'agronomique. Il permet en outre la mise en évidence des risques de drainage locaux liés à certaines pratiques comme la raie bouchée. L'approche intégrée développée ne permet cependant pas d'analyser les conséquences des percolations profondes locales sur le lessivage d'azote en liaison avec une pratique de fertilisation utilisée dans le S-E de la France. Pour répondre à ce problème complexe on s'appuie sur une modélisation mécaniste adaptée aux transferts bidimensionnels d'eau et de solutés (code numérique HYDRUS-2D, Simunek et al., 1996). On montre ainsi que le risque de lessivage est réduit dans ce cas même lors de régimes d'irrigation excessifs.

Abstract

An integrated approach to analyse environmental impacts and crop production effects of a surface irrigation practice. In the case of furrow irrigation, the analysis of variability sources and their impact on the advance process results in the development of an integrated modelling approach for testing the impact of irrigation practices on the efficiency and crop yield at plot scale. The first step of the modelling deals with the analytical modelling of the advance-infiltration process at the furrow scale for different irrigation methods. The coupling of a furrow irrigation model and a crop model, simulating water balance and crop yield, is performed using a parameter generator. The whole results in a integrated approach allowing to identify efficient irrigation practices (with acceptable crop yield levels), and to point out local risks of drainage. The operative character of the integrated approach does not allow the analysis of the impact of local drainage on the risks of Nitrate leaching. We then focus on that aspect by analysing the impact of a fertilisation practice used in S-E of France on the nitrate leaching by means of

field measurements and a modelling approach adapted to 2D water and solute transfer (Hydrus-2D model, Simunek et al, 1996). The result analysis shows that the fertiliser method reduces the risk of nitrates leaching during the irrigation season even under heavy infiltration rates. This work underlines the interest of using complementary approaches: "integrated" and specific mechanistic modelling, to deal with a difficult problem.

Introduction

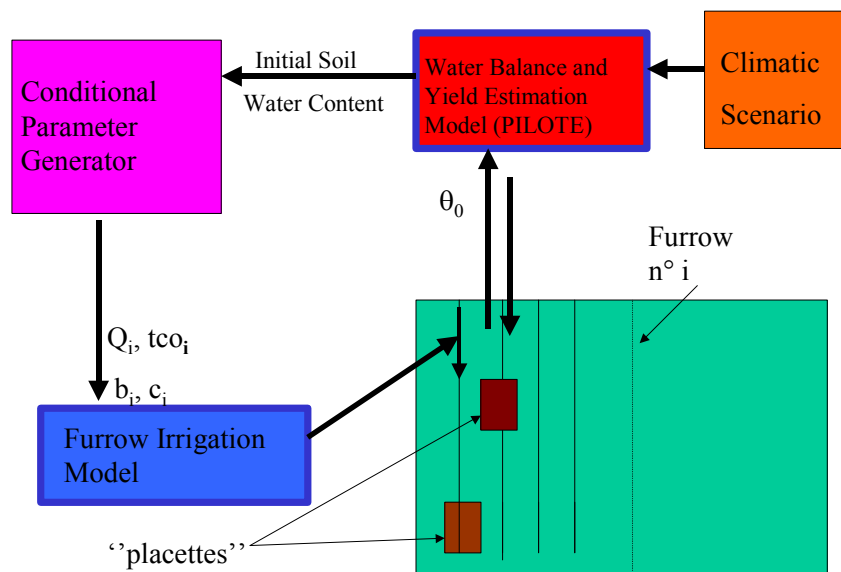
L'irrigation gravitaire demeure encore de nos jours le mode d'arrosage le plus répandu dans le monde. Dans les pays en voie de développement confrontés à des problèmes de ressources en eau limitées se pose la question du choix entre la modernisation des systèmes traditionnels et la reconversion vers des système réputés plus économes en eau. Malgré un effort conséquent de modernisation, l'irrigation gravitaire est encore de nos jours considérée comme une technique d'arrosage synonyme de gaspillages d'eau et génératrice de risques environnementaux. Une modélisation opérationnelle est ici proposée pour améliorer la pratique de l'irrigation à la raie. Son originalité repose sur le fait que son objectif ne se limite pas à l'évaluation de la performance hydraulique des arrosages (Eliot et Walker, 1982 ; Renault et Wallender, 1992 ; Shepard et al., 1993) ou à leur optimisation en temps réel (Mailhol, 1992 ; Mailhol et Gonzalez, 1993) comme ce fut jusqu'à présent le cas. En effet dans cette approche, on ne se propose plus d'exprimer les résultats seulement au niveau d'un événement (l'arrosage d'un jour considéré) et d'une ou quelques raies mais à l'échelle de la parcelle et de la saison de culture. En outre, les résultats concernent non seulement l'efficience hydraulique, avec notamment la prédiction de risques de drainages locaux excessifs, mais aussi l'efficience agronomique et sa variabilité, le rendement de la culture et sa variabilité étant aussi calculés.

Nous avons pris le parti de la modélisation pour améliorer les performances des systèmes d'irrigation gravitaire. Pour cela bien entendu, nous nous plaçons dans un contexte d'irrigation gravitaire modernisé, à savoir : parcelles nivelées au laser et équipées d'un systèmes de distribution en tête des débits tels que siphons, gaine souple ou rampe à vannettes.

Description du modèle intégré et de sa mise en oeuvre

Une pratique d'irrigation allie une règle de pilotage (opportunité d'irriguer) à une conduite d'irrigation. Cette dernière concerne le choix des paramètres de l'arrosage (débit-durée) ainsi que la méthode d'arrosage. Dans notre approche nous ne considérons que la technique de la raie ouverte (avec ruissellement dans des fossés de colatures) et la technique de la raie bouchée, les deux méthodes pouvant être menées avec simple ou double débit. L'approche de modélisation est schématiquement représentée à la figure 1. Elle se compose de trois sous-modèles d'un arrosage (Mailhol, 1992a ; Mailhol et Gonzalez, 1993).

Figure 1. Représentation schématique de l'approche intégrée



Le modèle d'irrigation à la raie simule le processus couplé avancement-infiltration selon une approche prédictive (Mailhol, 2001) du modèle analytique RAIEOPT initialement développé pour optimiser en temps réel les performances d'un arrosage. Le modèle permet également de simuler différentes conduites d'irrigation comme la raie bouchée (Mailhol, 1992b ; Mailhol et al., 1997a) avec la possibilité de prendre en compte des conditions de sol hétérogènes dans le sens amont aval de la parcelle (Mailhol et al., 1999). Il est donc possible de calculer la dose délivrée au sein d'une placette de largeur égale à l'espacement des raies et de longueur fixée a priori ($dx = 5$ ou 10 m selon la longueur de la parcelle).

Le modèle de culture PILOTE (Mailhol et al., 1997b ; Mailhol, 2001), fonctionne au niveau de chaque placette pour simuler au pas de temps journalier le bilan hydrique et le rendement sur la base d'un scénario climatique donné. A tout instant on peut donc estimer les conditions de la parcelle en termes d'humidité et plus particulièrement avant chaque arrosage, la valeur moyenne du déficit à saturation ($\theta_s - \theta_0$). Cette grandeur constitue avec la longueur capillaire λc et la conductivité hydraulique à saturation K_s , l'ensemble des trois paramètres du modèle d'irrigation.

Le générateur de paramètres repose sur l'hypothèse que les sources de variabilité affectant le processus d'avancement, sont étroitement liées à celles conditionnant l'infiltration. L'impact respectif des sources de variabilité imputables aux conditions de sol (degré de tassement, effet macro-pores, géométrie des raies, etc.) et aux débits alimentant les raies (pour un système de distribution donné) a été étudié à partir de l'analyse de l'avancement d'un échantillon de N raies. Cette analyse a été conduite dans des conditions de sol très contrastées : les vertisols de la plaine du Gharb au Maroc (parcelle expérimentale de l'ORMVAG) sur canne à sucre ; les limons de la parcelle expérimentale de Lavalette sur maïs (variété SAMSARA) au Cemagref de Montpellier.

Le protocole expérimental décrit de façon précise dans Mailhol et al., 1999 et Mailhol et al., 2001, consistait à suivre l'avancement d'une trentaine de raies à la fois, le débit alimentant chacune des raies étant mesuré à l'aide d'un seuil (de type Parshall ou RBC) portable. Des sites de mesures neutroniques et tensiométriques étaient installés au centre des parcelles à raison d'un site en amont un deuxième au milieu et enfin une troisième un peu avant l'extrémité aval. Seul le rendement du maïs à Lavalette a fait l'objet de mesures dans l'environnement des sites de mesures.

Les graphes de corrélation débits-avancements des N raies à une abscisse choisie lors d'une irrigation donnée mettent en évidence le rôle respectif joué par les sources de variabilité émanant du débit et du sol. L'état d'humidité du sol, ou les conditions régissant son infiltrabilité, comme sa préparation ou le traçage des raies jouent un rôle majeur et confèrent une « signature » aux différentes raies. Ainsi un processus d'auto-corrélation de l'avancement inter arrosages a pu être souligné à la faveur d'essais pour lesquels la variabilité des débits d'entrée était relativement faible ($Cv(Q) < 10\%$). A noter qu'une bonne corrélation ($R^2 > 0,70$) débit - avancement pour une abscisse donnée, atteste de conditions de sol assez homogènes et qu'un faible gain du degré de corrélation lors d'un essai effectué en conditions de sols humide témoigne d'une géométrie irrégulière ou d'un encombrement (mottes ou résidus de culture) des raies.

Sur parcelle homogène du point de vue de la texture du sol, l'origine des sources de variabilité est de nature aléatoire. De l'échantillon des N raies, les N couples de paramètres (λ_c, K_s) pour un arrosage donné, caractérisé par un déficit moyen mesuré ($\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$), ont été obtenus par méthode inverse (calage du modèle d'irrigation sur l'avancement). Les grandeurs statistiques de ces paramètres (moyennes et variances) ont été calculées. La moyenne de λ_c est en accord avec les valeurs proposées par la littérature de l'ordre de 10 cm pour un limon (White et Sully, 1987) et conformes aux valeurs trouvées par Revol (1994) par l'infiltromètre à disque sur cette même parcelle de Lavalette. Quand aux valeurs moyennes de λ_c obtenues pour les vertisols macro-fissurés du Gharb, elles sont de l'ordre de 70 cm, elles aussi en accord avec les valeurs de la littérature (25 à 30 cm pour sols argileux peu ou pas fissurés jusqu'à 100 cm pour sols très argileux macro-fissurés). Quand aux valeurs moyennes de K_s obtenues ($K_s = 1,4$ cm/h à Lavalette et 0,2 cm/h au Gharb) elles corroborent les valeurs déduites par mesure au double anneau à Lavalette et sont à la fois conformes aux valeurs proposées par la littérature et aux valeurs déduites des formules de type pédo-transfert. Les précédentes valeurs font référence aux paramètres du sol en place, c'est à dire non déstructuré par les travaux comme ceux relatifs au traçage de sillons. A cet égard, les valeurs que l'on obtient selon l'approche inverse sont généralement plus élevées que celles obtenus lors des irrigations suivantes. En règle générale les paramètres du sol tendent à se stabiliser au delà de la première irrigation. Durant la première irrigation survenant après traçage des raies, il n'est pas rare d'obtenir des valeurs égales au double de celles obtenues pour les irrigations suivantes ce qui est exactement le cas pour Lavalette.

Les valeurs des débits en tête mesurés suivent généralement une loi normale. Il en est de même pour la longueur capillaire λ_c , alors que K_s suit une loi Log-Normale. Ces deux derniers paramètres sont faiblement corrélés entre eux alors que le nuage des points fait apparaître une tendance qui mérite d'être prise en considération.

Le caractère aléatoire des variables mises en jeu justifie l'usage d'un générateur de paramètres reposant sur la méthode de Monte-Carlo. Le tirage des paramètres dans leur loi de probabilité respectives est néanmoins assujéti à des contraintes. La première concerne la tendance mise en évidence pour le couple (λ_c, K_s). La satisfaction de cette contrainte aura pour conséquence d'éviter l'appariement entre elles de valeurs fortes (risque de générer une raie trop lente) ou faibles (risque de générer une raie trop rapide). La deuxième concerne la conservation de l'auto-corrélation du processus d'avancement inter arrosages. La prise en compte de ce phénomène est nécessaire si l'on souhaite améliorer l'estimation du risque de drainages locaux excessifs souvent synonymes de lessivage d'azote. En effet, des zones systématiquement sur irriguée génèrent des risques élevés de drainage locaux. Ce risque est accru dans le cas de la pratique en raie bouchée où les raies les plus rapides peuvent occasionner la présence de fortes lames d'eau près de l'endiguement aval. Au contraire, des zones systématiquement sous irriguées pénalisent fortement le rendement de la culture. La prise en compte de ce phénomène d'auto-corrélation a consisté à mémoriser la hiérarchie du premier arrosage. Et à la conserver lors des arrosages suivants. Il va de soi que cette conservation du classement porte sur les potentialités d'infiltration des raies étant entendu qu'elles ne reçoivent pas le même débit d'un arrosage à l'autre.

Validation du modèle

Sous l'hypothèse de conditions d'humidité initiales homogènes proches de 0,75 de la capacité au champ au 1^{er} Avril de l'année 99 (démarrage de la simulation), la moyenne et la variabilité de l'avancement pour les 4 arrosages effectués en 99 à Lavalette sont assez bien simulées. Il en est de même pour la dose minimale apportée aux environs du site moyen (tableau I).

Tableau I. Comparaison entre simulation et observation durant la saison d'irrigation. TL est le temps d'avancement, Dm sim est la dose minimale (mm) simulée et Dm obs est celle obtenue au site central par mesure neutronique

N° Irrig.	TL obs. (mn)	Cv(TLo)	TL sim. (mn)	Cv(TLs)	Dm obs. (mm)	Dm sim. (mm)	Cv(Dms)
1	89	20	92	19	65	61	17
2	111	22	109	23	55	51	18
3	82	18.5	81	16	39	40	10
4	37	15	35	13	15	14	14.6

On pourra constater au regard de la figure 2 un assez bon respect de la corrélation de l'avancement inter arrosages. La carte des rendements simulés (figure 3) est le reflet de la pratique de la raie bouchée avec une surestimation des rendements aval. Notons cependant qu'aucune différence significative n'existe entre les 3 sites de mesure et que la différence avec le témoin bien irrigué en aspersion atteint 10 qx/ha seulement pour un coefficient de variation de 8 % des rendements mesurés. Il convient en outre de signaler que le maïs est apparu plus développé sur les quelques derniers mètres à l'aval des raies.

Figure 2. Corrélation observée et corrélation simulée entre avancements des 2^e et 3^e irrigation à Lavalette

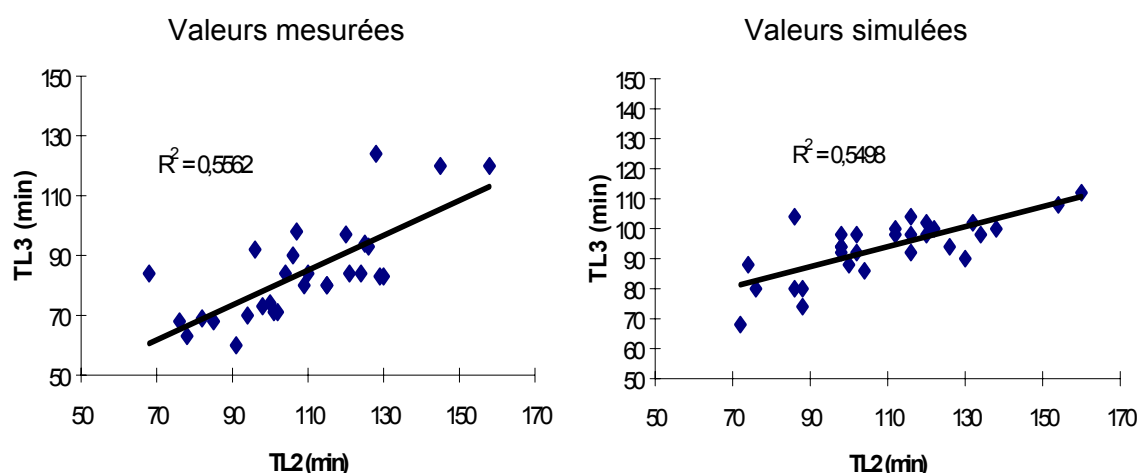
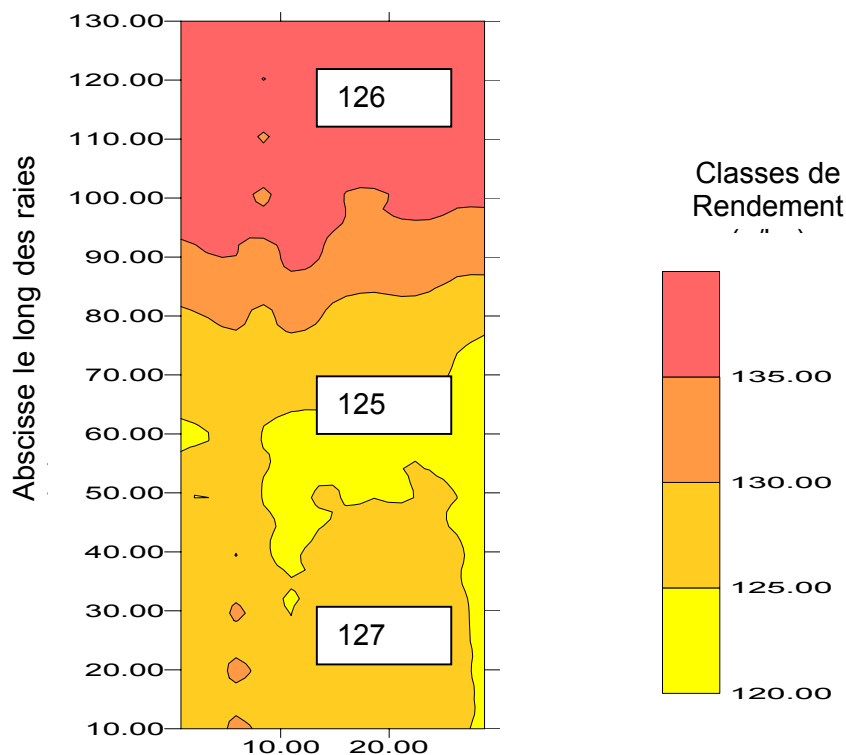


Figure 3. Simulation du rendement en maïs (g/ha) à Lavalette en 1999 sur une sous parcelle de 35 m de largeur (les valeurs encadrées sont des valeurs moyennes mesurées sur 7 placettes de 3.2 m² à proximité des sites de mesures)



Des recherches plus poussées doivent être entreprises pour identifier l'origine de cet état de fait en liaison avec la technique de fertilisation adoptée. En effet, le fait de concentrer l'azote sur la partie haute des billons lors du traçage des raies juste après apport, assujettit une part de l'azote apporté à être difficilement accessible à la culture.

Pour le contexte des sols lourd du Gharb, on trouvera dans Mailhol et al. (1999) une validation de la méthode de simulation stochastique utilisée portant sur le respect des statistiques de l'avancement en condition de sol hétérogènes du point de vue humidité

Application du modèle à l'identification d'une pratique d'irrigation efficace

A titre d'exemple, le modèle est utilisé pour comparer deux pratiques d'irrigation du maïs dans un contexte de sol ayant les propriétés de celui de Lavalette ($\overline{K_s} = 2.8$ cm/h et $\overline{\lambda_c} = 20$ cm pour la première irrigation et $\overline{K_s} = 1.4$ cm/h et $\overline{\lambda_c} = 10$ cm pour la deuxième irrigation).

On adopte la même pente $S_0 = 0,25$ % qu'à Lavalette mais avec une longueur de parcelle de 250 m, (soit environ le double de Lavalette) justifiant d'un point de vue économique l'usage d'une rampe à vanettes (DDAF et al., 1989). La largeur qu'il est convenu de simuler est de 100 m avec un espacement des raies de 0.8 m. Les deux pratiques que l'on se propose de comparer sont l'irrigation avec colatures et l'irrigation en raies bouchées, la règle de décision adoptée consistant à arroser tous les 15 jours avec un report de l'irrigation d'un jour par 10 mm de pluies tombée. Le scénario climatique choisi est celui de l'année 95 considérée comme une année moyenne, celui de 99 ayant été davantage pluvieux durant le cycle cultural. Pour un semis le 20 avril la première irrigation est appliquée le 15 juin (date assez fréquente sous nos latitudes pour peu que le printemps ait bénéficié de quelques pluies).

Des valeurs de débits de 2 et 1.5 L/s respectivement pour la première et les irrigations suivantes induisent des coefficients d'uniformité (CU) acceptables, les coefficients de variation des débits d'entrée ($Cv(Q)$) étant supposés égaux à 5 % pour un système rampe à vanettes performant (Trout, 1990 ; Mailhol et al., 1999). Dans les deux cas on souhaite apporter une dose minimale de 45 mm.

Le cas raie bouchée

Pour une dose minimale requise de 45 mm une bonne gestion de l'irrigation est obtenue pour un temps d'irrigation $T_{irrig} = 1.1 \overline{TL}$, ($1.2 \overline{TL}$ pour le 1^{er} arrosage), \overline{TL} étant le temps moyen d'arrivée en bout de raie. L'efficacité moyenne des quatre arrosages proposés atteint 76 % ($Cv = 6$ %). Le rendement moyen simulé de la culture est de 124 qx ($Cv = 8$ %) pour une dose brute de 270 mm. La valeur maximale du drainage sur une placette est de 138 mm, le nombre de placettes ayant un drainage supérieur à 50 mm n'étant cependant que de 5 %. Dans l'hypothèse d'un $Cv(Q)$ de 10 % au lieu de 5 on perd 2 points d'efficacité, sa variabilité passant de 6 à 10 % et celle de la dose minimale infiltrée passe de 7 à 14 %. Quand au rendement il est peu affecté par cet accroissement de variabilité du débit.

Le cas raie avec colatures

Avec un temps d'arrosage $T_{irrig} = 1,3 \overline{TL}$ ($1,4 \overline{TL}$ pour le 1^{er} arrosage) l'efficacité moyenne chute à 57 % ($Cv = 4$ %), la dose minimale requise n'étant pas tout à fait atteinte (DMR = 43 mm, $Cv = 6$ %). Le rendement de la culture est de 119 qx ($Cv = 11$ %) pour une dose brute de 300 mm. Pour atteindre un rendement beaucoup plus élevé ($R_t = 133$ qx) il convient d'accroître la durée d'entretien ($T_{irrig} = 1,8 \overline{TL}$). Il en résulte une dose minimale plus élevée ($D_m = 55$ mm), l'uniformité moyenne est améliorée ($UC = 78$ %) mais la dose brute passe à 390 mm. Quant au pertes en colatures elles augmentent très significativement ($P_c = 27$ %, $Cv = 20$ %). Les risques de drainage sont très faibles cependant, même avec $Cv(Q) = 10$ %. La conduite en raies bouchées dans un contexte de faible variabilité de l'avancement ($Cv(TL) < 15$ %) et pour des temps moyens d'avancement n'excédant pas 150 mn comme dans l'exemple traité peut conduire à la meilleure efficacité agronomique et ce avec des risques de drainages locaux relativement réduits. Cette méthode d'arrosage lorsqu'elle respecte les conditions indiquées peut donc être appliquée dans des régions où les risques d'orages importants sont faibles durant le cycle cultural. Pour des parcelles de longueur plus importantes ($L > 400$ m) où les valeurs de K_s sont nécessairement plus élevées la simulation montrerait qu'il est déconseillé de pratiquer la raie bouchée en raison des risques de drainages excessifs encourus.

Les risques de lessivages d'azote dans le contexte bidimensionnel de la raie

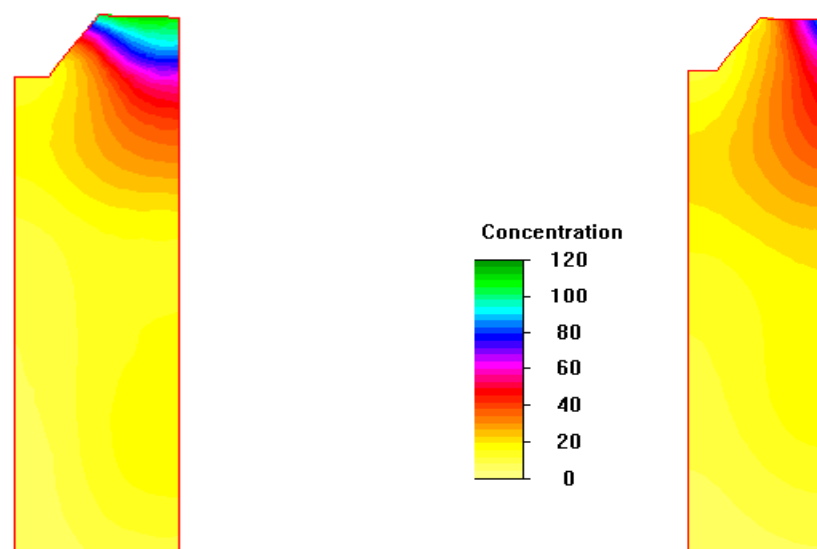
La modélisation proposée permet une estimation des risques de drainage locaux résultant d'une pratique d'irrigation à la raie. Il est bien évidemment légitime de s'interroger sur les conséquences de ces drainages locaux sur le lessivage des nitrates. Selon la modélisation ici proposée, le rendement sur chaque placettes est donc calculé en supposant que l'azote n'est pas un facteur limitant. En contexte monodimensionnel d'infiltration, un drainage excessif est bien souvent synonyme de lessivage d'azote. Il peut en être autrement dans le contexte bidimensionnel de la raie, notamment en liaison avec la technique de fertilisation consistant à concentrer l'azote en partie haute des billons lors du traçage des raies. Afin de pouvoir juger des risques de lessivage d'azote dans le contexte bidimensionnel des transferts d'eau et de solutés de la raie, un outil adapté à cette problématique est nécessaire. Le code numérique Hydrus2D (Simunek et al., 1996) permet de simuler via l'équation de Richards et l'équation de convection-dispersion les transferts d'eau et de solutés pour une géométrie définie du domaine. Cet outil est donc proposé en complément

de l'approche intégrée développée ici pour apporter une réponse à la question qu'elle a permis de poser concernant les risques de lessivage d'azote.

Des profils de teneur en azote du sol ont été effectués au droit de la raie et du billon selon le protocole décrit dans Mailhol et al. (2001) à différentes périodes du cycle au voisinage des sites de mesure.

La figure 4 donne le résultat de la simulation selon Hydrus-2D pour 2 sites dans la raie. Le premier site concerne les zones où le tirant d'eau dépasse rarement 5 cm, du fait qu'elles échappent à l'effet d'endiguement aval occasionné par la raie bouchée. Le deuxième site concerne la zone la plus en aval sujette à l'endiguement et où le tirant d'eau peut atteindre des valeurs de 12 à 15 cm selon la profondeur maximale de la raie. Les régimes d'infiltration et les temps d'opportunité (temps de présence de l'eau à une abscisse donnée) sont élevés dans cette zone sujette à la submersion. Il paraît logique dans ce dernier contexte d'envisager que le réservoir d'azote localisé en partie haute des billons soit davantage sollicité pour le transfert qu'en zone à faible tirant d'eau. C'est en effet ce que l'on constate sur la figure 4 qui représente la distribution de l'azote dans le profil du sol en fin de campagne d'irrigation sur la base du scénario climatique de 1995 ayant fait l'objet de 4 irrigations.

Figure 4. Distribution de l'azote en fin de campagne d'irrigation sous faible tirant d'eau ($h_0 = 5$ cm) et en aval de la raie bouchée ($h_0 = 12$ cm)



Les termes sources (minéralisation) et termes puits (consommation de l'azote par la plante) ont été simulés. Pour cela on a considéré un taux journalier de minéralisation tel qu'il avait été estimé durant la campagne 99 (de l'ordre de 1kg/ha/jour) et un taux de consommation en accord avec les exigences en azote de la plante au cours des différentes étapes du cycle. Les irrigations sont séparées par des périodes de redistribution où pluies et ETP sont prises en compte.

Chaque événement (infiltration ou redistribution) utilise pour conditions initiales le profil final (d'eau et d'azote) de la simulation de l'événement qui le précède. En dépit de certaines incertitudes notamment concernant les fonctions puits ou sources, les simulations effectuées sur la campagne 99 attestent d'une assez bonne cohérence avec les mesures de profil d'azote effectuées en fin de cycle.

Selon la simulation Hydrus-2D le lessivage d'azote est très faible (quelques ppm) en deçà de la profondeur racinaire maximale du maïs qui est de 1,2 m. dans le contexte de Lavalette même dans les zones où l'infiltration cumulée atteint ou dépasse 120 mm durant chaque irrigation. L'azote déplacé de la partie haute du billon recharge la base du profil sous la raie

laissant supposer une meilleure disponibilité de l'azote pour la plante. Ce résultat n'est évidemment pas généralisable pour tous les sols notamment ceux où prédominent les effets macro-pore.

Conclusion

La modélisation proposée est une contribution à l'amélioration des systèmes d'irrigation gravitaire. Son originalité réside dans le fait que contrairement aux approches classiques elle ne se focalise pas sur un seul événement et sur un nombre très limité d'éléments irrigués (la raie ou quelques raies) mais traite du concept d'efficacité agronomique à l'échelle de la parcelle. Elle permet de répondre à une problématique environnementale dans la mesure où elle se propose d'estimer les risques de drainage locaux excessifs.

Son caractère opérationnel ne nous permet cependant pas d'affirmer si ces drainages locaux entraînent du lessivage d'azote en liaison avec certaines pratiques de fertilisation. Seule une modélisation mécaniste spécifique à ces processus de transfert de soluté peut apporter des éléments de réponses.

L'usage du code numérique Hydrus-2D en complément à l'approche conceptuelle développée nous a permis de montrer que les drainages locaux identifiés n'induisaient que des risques relativement faibles de lessivage même sous régimes élevés d'apport d'eau dans les cas étudiés. Cela n'est évidemment pas sans rapport avec la technique de fertilisation adoptée consistant à accumuler une part substantielle de l'azote apporté sur la partie haute des billons. Ce réservoir d'azote est essentiellement sollicité par les forces capillaires en raison de la géométrie du domaine d'écoulement alors que les forces de gravité sont plutôt dominantes au droit même de la raie.

Bibliographie

DDAF Arles, Cemagref, SCP, ARDEPI, 1989. Acquisition de références technico-économiques sur les matériels d'irrigation de surface (ARTHEMIS). Cemagref Aix en Provence, 95 pp.

ELLIOT, R. L., and WALKER, W. R., 1982. Field evaluation of furrow irrigation and advance functions. Trans. ASAE, 25(6), 396-400.

MAILHOL, J.C. 1992a. Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. ICID Bulletin, 1992 vol. 41 n°1, 43 - 60.

MAILHOL, J.C., 1992b. Méthodes de conduite de l'irrigation à la raie pour améliorer son efficacité. 16th European Regional Conference of ICID. BUDAPEST juin 1992, 174-183

MAILHOL, J.C., GONZALEZ G., 1993. Furrow irrigation model for real-time applications on cracking soils. Journal of Irrig. and Drain. Engin. ASCE, Vol. 119, No. 5. 768- 783

MAILHOL, J.C., BAQRI, H., AND LACHHAB, M., 1997a. Operative irrigation furrow modelling for real-time applications on closed-end furrows. Irrig. and Drain. Syst. 11: 347-366.

MAILHOL, J.C., OLUFAYO A., A., RUELLE, P., 1997b. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. Agri. Water Manag. 35 167-182p

MAILHOL, J.C., PRIOL, M., AND BENALI, M., 1999. A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. Agric. Water Manag. 42, 65-80.

MAILHOL, J.C, RUELLE, P., 1999. Un outil opérationnel pour l'analyse des stratégies d'irrigation du maïs au moyen d'un canon enrouleur. ICID Grenade Sept 1999, 48, 87-99.

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 Univ. Montp. II, 260 p + annexes.

MAILHOL, J.C., RUELLE, P., NEMETH, I., 2001. Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. Irrig. Sci (2001) 20: 139-147.

RENAULT, D. AND W.W. WALLENDER, 1992. ALIVE Advance linear velocity: a flow rate balance theory for surface irrigation. Journal of Irrig. and Drain. Eng., ASCE 118 (1): 135-155.

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.

SHEPARD, JS., WALLENDER, W.W. ET J.W. HOPMANS 1993. One point method for estimation infiltration. Trans. of ASAE Vol. 36 (2) March-April, 395-404 p.

TROUT, T. J., 1990. Furrow inflow and infiltration variability impacts on irrigation management. Transaction of ASE, 33(4):1171-1178.

WHITE I. ET SULLY J., 1987. Macroscopic and microscopic capillarity length and time scales from field infiltration. Water Resour. Res. 2. :1514-1522.