

Systèmes d'irrigation et économies d'eau sous climat méditerranéen: Etude expérimentale et modélisation

Mailhol*, J.C., Ruelle*, P., Khaledian**, M.R., Mubarak*, I., Rosique*, P.

*UMR G-EAU Cemagref, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 05 France

** Gullan University, Iran

Résumé

Des systèmes de cultures comme le semis direct sous couverture (SCV) ou l'adoption des techniques d'irrigation localisée, intéressent considérablement les régions du Maghreb confrontées à des déficits hydriques que le changement climatique devrait encore accroître. La technique de la source linéaire en surface ou enterrée s'avère de plus en plus pratiquée notamment en maraîchage. Son application en grande culture en ce qui concerne le système enterré, fait l'objet d'études sur le plan technique. Il importe en effet de bien dégager au préalable les contraintes techniques afin de pouvoir établir, en fonction du contexte local, les contraintes économiques. On présente ici les résultats d'essais menés à Montpellier (station expérimentale du Cemagref) lors des campagnes 2007 et 2008, sur des parcelles de maïs en système conventionnel et SCV et irriguées selon différentes modalités. On s'appuie ensuite sur la modélisation pour estimer les possibles économies d'eau sous climat méditerranéen.

Le rendement saison 2008 obtenu sur parcelle plantées à raison de 8 plts/m² avec gaines enterrées espacées de 1.6m n'est pas significativement différent de celui obtenu sur parcelle plantée à raison de 10plts/m² avec gaines enterrées espacées de 1.2 m, ces deux parcelles ayant reçues une dose équivalente. Ce résultat obtenu en sol limoneux est à l'évidence intéressant d'un point de vue économique (moins de gaines à l'hectare). Concernant le profil d'humidité du sol, le système avec écartement des gaines à 1.60 m témoigne d'une plus forte contribution du sol à la satisfaction des besoins en eau. Le SCV sous aspersion, et le système enterré affichent tous deux une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau que le système conventionnel (avec travail du sol) en aspersion. Concernant le système enterré, compte tenu caractère relativement pluvieux du printemps de ces deux années, ce constat se doit d'être vérifié dans des conditions nécessitant une mise en route précoce du système d'irrigation. La modélisation numérique des transferts d'eau sous irrigation localisée montrent que lors de printemps secs, il s'avère impossible d'assurer la levée et une mise en place satisfaisante du système racinaire avec l'irrigation enterrée. L'application d'un apport d'eau par un système d'aspersion est pour cela nécessaire. Après adaptation du modèle de culture PILOTE au cas du système enterré, on montre que pour un objectif de rendement de 15T/ha, ce système permet une économie d'eau de l'ordre de 350 m³/ha sur le cas du maïs. Une étude économique intégrant le risque climatique est cependant nécessaire pour juger de l'intérêt économique de l'adoption de ce système par rapport à l'aspersion sur le cas des grandes cultures.

1. Introduction

L'irrigation localisée, technique réputée économe en eau, connaît une extension rapide dans les régions sujettes au déficit hydrique comme au Maghreb (Slatni et al., 2004). Parmi les techniques mises en œuvre dans ce système d'irrigation, celle de la source linéaire (gaine d'irrigation goutte à goutte) en surface ou enterrée s'avère de plus en plus pratiquée notamment en maraîchage. Son application en grande culture, concernant notamment le système enterré, fait l'objet d'études sur le plan technique dans différents pays. En effet il importe de bien dégager au préalable les contraintes techniques afin de pouvoir établir, en fonction du contexte local, les contraintes économiques, notamment en milieu méditerranéen.

Le présent article présente des résultats d'essais menés à Lavalette (Cemagref de Montpellier) sur des parcelles de maïs irriguées selon différentes modalités et ceux pour les deux saisons 2007 et 2008. Celles-ci portent sur les systèmes eux mêmes (en surface ou enterrés), mais aussi sur l'espacement des gaines en liaison avec la densité de plantation. Le contexte climatique particulier de ces deux années d'essais (printemps très pluvieux) ne nous a pas permis de dégager des conclusions pertinentes quant à l'intérêt du système enterré par rapport au système de surface ou encore par rapport à l'aspersion. Pour tenter d'apporter une réponse à la question: que peut-on espérer en termes d'économies d'eau en pratiquant l'irrigation enterrée, on se propose d'utiliser la modélisation appliquée à des conditions susceptibles de mettre en défaut la technique du localisé et plus particulièrement du localisé enterré. Ces conditions particulières sont celle d'une longue période sans pluie entre la fin avril (date de semis) et le début septembre. Ces conditions typiques des régions du Maghreb seront amenées à se produire de plus en plus fréquemment en bordure nord de la méditerranée selon l'hypothèse du changement climatique.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Le contexte expérimental

Le contexte expérimental est celui du nord de Montpellier (43° 40'N, 3° 50'E, altitude 30 m), à 15 km environ de la mer. Les parcelles d'essais s'étendent dans le lit majeur du fleuve Lez. Elles font référence à deux types de systèmes de culture, un système dit conventionnel (CT), avec travail du sol, l'autre sans travail du sol en semis direct sous couverture (SCV). Le sol, de type limoneux est constitué de 43% de limons, 40% de sable et 17% d'argile. La teneur en eau volumique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent sont de 0.29 et 0.11 respectivement. Le sol de la parcelle a fait l'objet d'une caractérisation hydrodynamique en vue de modéliser les transferts d'eau sous irrigation localisée (Mubarak et al., 2009). Les expérimentations effectuées en 2007 ont trait à des parcelles de maïs équipées en aspersion et en irrigation localisée de surface avec des gaines espacées de 1.60 m, soit une gaine tous les deux rangs de maïs. Celles effectuées en 2008 se composent de parcelles en aspersion et des parcelles avec système d'irrigation enterré à 35 cm. Pour ces dernières, il s'agit d'une parcelle avec un espacement des gaines de 1.6 m et d'une autre avec un espacement des gaines à 1.20 m. Afin de compenser l'écartement des rangs de maïs résultant de la différence d'écartement des gaines, une densité de 10 et 8 plants par m² a été respectivement adoptée. Pour chacune des deux années une référence en sec est proposée. Les parcelles ont été fertilisées (en fertigation pour le localisé) en tenant compte des conditions initiales d'azote, du taux de minéralisation généralement constaté dans les conditions climatiques moyennes de Lavalette (Mailhol et al., 2001) et du rendement potentiel de la variété Pionner PR35Y65 (de l'ordre de 18 T/ha). Suite à un défaut d'application d'azote en 2008 sur la parcelle en sec et en aspersion, du à un problème matériel, ces traitements n'ont pas été pris en compte dans les comparaisons envisagées.

2.2. La modélisation

Les outils de modélisation aux quels on se réfère dans le cadre de ce travail sont le code numérique HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) pour simuler les transferts d'eau sous irrigation localisée et le modèle PILOTE (Mailhol et al., 1997, Khaledian et al., 2009) pour simuler le bilan hydrique et le rendement. Le code numérique ne sera utilisé ici que pour analyser les conditions de mise en place de la culture sous irrigation enterrée.

Le modèle de culture PILOTE est composé d'un module sol et d'un module plante, ce dernier étant basé sur la simulation du LAI (Leaf Area Index). Le module sol est de type capacitif et se compose de trois réservoirs dans lesquels les transferts sont supposés monodirectionnels. Le premier de profondeur fixe (10 cm) permet de gérer les conditions atmosphériques (pluies, évaporation du sol, transpiration) les 2 autres sont à capacité variable avec l'enracinement. Le deuxième, réservoir racinaire est alimenté par le drainage du premier. Il alimente à son tour le troisième appelé réservoir de drainage, la lame d'eau D qu'il ne peut contenir, étant considérée perdue par le système (D= drainage). Le caractère monodirectionnel laisse présager une certaine inadaptation du modèle au cas du goutte à goutte. Cependant, en conditions méditerranéennes, eu égard au mode particulier d'apports d'eau propres à ce système (faibles mais fréquents) il apparaît que le sol joue un rôle de support d'échange avec la plante par le biais des conditions imposées par le climat environnant (Mubarak et al., 2009a), l'eau apportée étant consommée quasiment le jour même ou les jours qui suivent cet apport. On avait, lors de travaux précédents, justifié le couplage d'un modèle de culture de type PILOTE avec un modèle d'irrigation à la raie (Mailhol et al., 2001, Mailhol, et al, 2005, Crevoisier et al., 2008), système pour lequel il est généralement admis que les transferts sont de type 2D. En conséquence tout semble se passer comme si la plante puisait dans un réservoir indépendamment du mode d'apport à condition que l'eau introduite dans ce réservoir soit accessible au système racinaire dans son ensemble. Ce constat exclue bien évidemment les situations d'apports susceptibles d'être en contradiction avec ce qui précède à savoir celles pouvant initier des écoulements préférentiels générant des pertes hors système. En goutte à goutte, on déconseille généralement de ne pas laisser le sol se dessécher fortement pour éviter ce genre de situations fréquentes dès que le sol contient un peu d'argile.

L'objectif du modèle PILOTE, dans son application au goutte à goutte, se limite à la simulation du rendement. En effet, contrairement au gravitaire à la raie, où l'on a pu montrer que le bilan hydrique peut être correctement simulé en raison d'apport relativement important (doses > 40 mm en moyenne) au niveau d'un site de mesure équipé de tube de sonde à neutron, il semble plus difficile de vérifier qu'il en est de même dans le cas du goutte à goutte au niveau d'un tube neutronique quelconque. En revanche, la valeur de l'ETR, parce qu'il est associé au niveau de rendement demeure une valeur universelle quelle que soit la technique d'irrigation utilisée et eu égard aux explications qui précèdent.

2.2.1. Adaptation de PILOTE au cas du système d'irrigation enterré

Au cours du cycle de culture le réservoir superficiel gère les flux relatifs à la pluie, l'évaporation du sol E_s et la transpiration T_p sur la base du coefficient de partage C_p (Varlet-Grancher, 1982) calculé à partir du LAI:

$$C_p = 1 - \exp(-kLAI) \quad (1)$$

Evaporation et transpiration s'écrivent alors $E_s = ET_0 (1 - C_p)$ où ET_0 est l'évapotranspiration de référence (Allen et al., 1998) et $T_{p1} = C_p K_c ET_0$, où K_c est le coefficient cultural calculé à partir du LAI (Alison et al., 1983):

$$K_c = K_{cmax}(1 - \exp(-LAI)) \quad (2)$$

Le bilan hydrique au jour j, afférent à ce réservoir superficiel se formule alors:

$$R1(j) = R1(j-1) + P(j) - Tp1(j) - d1(j) \quad (3)$$

Avec:

$$d1(j) = \max(0, R1max-R1) \quad (4)$$

A ce stade on écrit que lors d'un apport d'eau par le système enterré,

$$d1(j) = d1(j) + Dose(j) \quad (5),$$

l'éventuel surplus d'eau émanant du réservoir superficiel est complété par une dose (Dose(j)) d'irrigation au jour j.

Selon la formulation de PILOTE, d1(j) alimente le deuxième réservoir R2 qui s'accroît à chaque pas de temps du produit $\theta Vr(j)$.

$$R2(j) = R2(j-1) + \theta Vr(j) - Reste(j) + d1(j) - d2(j) \quad (6)$$

Reste est le complément d'eau devant être prélevé par la plante dans R2 pour satisfaire $ET_{max} = Kc ET_0$. Lorsque R1 est vide, ($\theta = Ppf$), la plante prélève l'eau dans l'eau uniquement dans R2 selon $Tp2 = Kc ET_0$. $Vr(j)$ est la croissance racinaire du jour j (basé sur la thermique) et $\theta(mm/m)$ l'humidité de la couche sous jacente, humidité moyenne de R3 actualisée à partir de:

$$R3(j) = R3(j-1) - \theta Vr(j) + d2(j) - D(j) \quad (7)$$

où D(j) est le drainage.

On suppose que $ET = ET_{max}$ tant que R1 contient de l'eau et/ou tant que la réserve facilement utilisable de R2 n'est pas épuisée. Le calcul de $ET = Tp2$, dans R2 est basé sur la réduction linéaire de ET_{max} . Cette réduction prend effet lorsque la teneur en eau de ce réservoir passe en deçà du seuil critique défini par:

$$Rs(j) = (1 - Kr) Pr(j) RU \quad (8)$$

où Kr , est selon Doorenbos et Kassam (1979), le rapport entre RU (mm/m), la réserve utile, et la réserve facilement utilisable.

Ainsi formulé, l'évaporation du sol au cours du cycle n'est pas nulle tant que R1 contient de l'eau, alors qu'en dehors du cycle de culture R2 participe mais de façon beaucoup plus soutenue à l'évaporation du sol. Concernant le rendement, ce dernier est basé sur la simulation du LAI via une fonctionnelle intégrant un indice de stress calculé par le module sol. La biomasse totale est calculée à partir des formulations classiques utilisées dans les "Process- Based-Models". La production de biomasse totale repose sur un pool commun au fruit (grain) et aux autres composants de la partie aérienne. Son calcul au jour J résulte du produit de la fraction de lumière interceptée (fonction du LAI) par la radiation potentiellement active (PAR) et par l'efficacité de conversion de la lumière, (RUE). Un indice de stress hydrique est utilisé pour affecter les potentialités de production. Le calcul du rendement en grain se fonde sur un indice de récolte potentiel susceptible de décroître à partir d'un seuil critique de LAI calculé entre

deux stades végétatifs critiques définis en somme de températures. Pour plus de détails, le lecteur est invité à se reporter aux articles précédemment cités concernant PILOTE.

3. Résultats

3.1 Expérimentaux

Le Tableau 1 ci-après regroupe les doses et les rendements pour les différents systèmes utilisés au cours des deux campagnes d'irrigation du maïs à Lavalette. Système conventionnel (CT), avec travail du sol et semis direct sous couverture (SCV) y sont représentés. La pluviométrie durant le cycle est sensiblement équivalente. L'essentiel des précipitations concerne la période allant du semis (25/04) au 15 Juin, avec un complément d'une vingtaine de mm aux environs du 12/07 pour 2008. Les traitements 2008 ne concernent que le système goutte à goutte (Gag) en conventionnel (CT) enterré.

Tableau 1 Doses et rendements matière sèche totale (MST) et grain, lors des campagnes 2007-2008 selon les différents systèmes d'irrigation (* ce traitement a reçu une quantité d'azote très supérieure au CT₁)

Années	Systèmes	Doses (mm)	MST (T/ha)	Grain (15% hu)(T/ha)
2007 P(cycle) = 205 mm	Aspersion CT ₁	218	24	14.3
	Aspersion CT ₂ *	218	25.2	14.8
	Gag surface CT ₃	260	26.1	15.6
	Gag surface CT ₄	430	29.4	17.4
	Gag surface CT ₅	306	27.5	16.4
	Sec CT ₀ **	0	12.7	4.9
	Sec SCV***	0	13	6.1
	Aspersion SCV	181	26	14.1
2008 P(cycle) = 220 mm	Gag CT ₁ enterré Es =1.2 m	235	26	15.1
	Gag CT ₂ enterré Es =1.6 m	198	24	15

*ce traitement a reçu une quantité d'azote très supérieure au CT₁ ** apport d'azote : 93 kgN/ha, *** apport d'azote : 27 kgN/ha, Es = espacement entre les gaies goutte à goutte

On peut constater que quelque soit le système d'irrigation, on obtient des rendements plutôt proches avec une dose au voisinage de 200 mm pour ces deux campagnes où les pluies printanières ont permis de ne déclencher l'irrigation qu'au de là du 15 juin. A cette date, le LAI avait dépassé la valeur de 3.5, rendant négligeable l'évaporation du sol quelque soit le système. C'est très certainement pour cette raison que les trois systèmes donnent des valeurs de rendement comparables. On constate également qu'en sec, le rendement du SCV est supérieur à celui du CT avec un apport d'azote limité. Sur ces traitements en sec, l'évaporation du sol est plus importante car le LAI est faible. L'effet mulch revêt dans ce cas toute son importance dans la réduction de l'évaporation du sol, l'eau non évaporée étant alors transpirée. Une simulation de ce système de culture avec la version de PILOTE adaptée au cas du SCV (Khaledian et al., 2008) sur une série climatique de 18 années à Lavalette a montré, pour le cas du maïs à Lavalette, qu'une économie d'eau équivalente à une dose d'irrigation par aspersion (≈ 35 mm) pouvait en moyenne être réalisée (Khaledian, 2009). Un gain moyen d'efficacité d'utilisation de l'eau ($WUE = (Rt - Rt(sec))/V_{apport}$) de 30% peut être obtenu sur cette série de 18 années et ce, pour un rendement moyen objectif $Rt = 13$ T/ha.

La figure 1 ci après présente le résultat des simulations effectuées par le modèle PILOTE calé lors d'expérimentations antérieures à la fois sur CT et SCV (Khaledian et al., 2008). On peut dire que le modèle simule de façon satisfaisante les rendements des différents systèmes d'irrigation. Sur le cas particulier du système enterré, PILOTE simule exactement les MST des deux traitements de 2008 ainsi que le rendement en grain du traitement GagCT1, le rendement en grain de GagCT2 étant relativement sous estimé. L'indice de récolte de GagCT2 est supérieur à celui de GagCT1. Cet état de fait est à mettre sur le compte de l'effet densité: on produit moins de matière sèche au m² mais les épis sont sensiblement plus gros. Cette similarité dans les rendements de ces deux traitements contraste quelque peu avec les profils d'humidité obtenus à la sonde à neutrons comme en témoigne la figure de 2. Cette figure montre en effet que la réserve hydrique du sol est davantage sollicitée sur le traitement CT2 (Es = 1.6 m) que sur CT1 (Es = 1.2 m). La différence de dose apportée à l'hectare, voisine de 40 mm, a été en partie comblée par le sol pour donner un rendement du même ordre. Ce constat aurait été certes différent dans des conditions climatiques autres, celles par exemple d'un printemps sec.

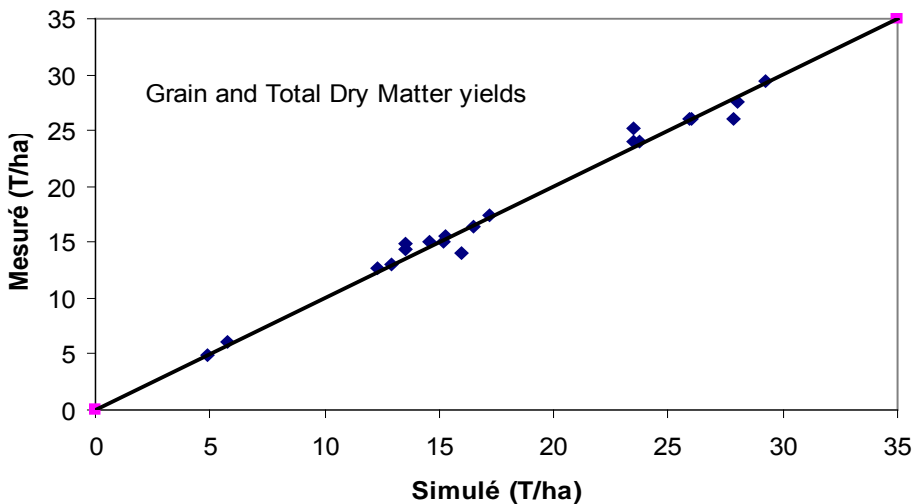


Fig.1. Simulation des rendements MST (matière sèche totale) et Rt (grain) par le modèle PILOTE sur les campagnes 2007-2008 pour différents systèmes d'irrigation

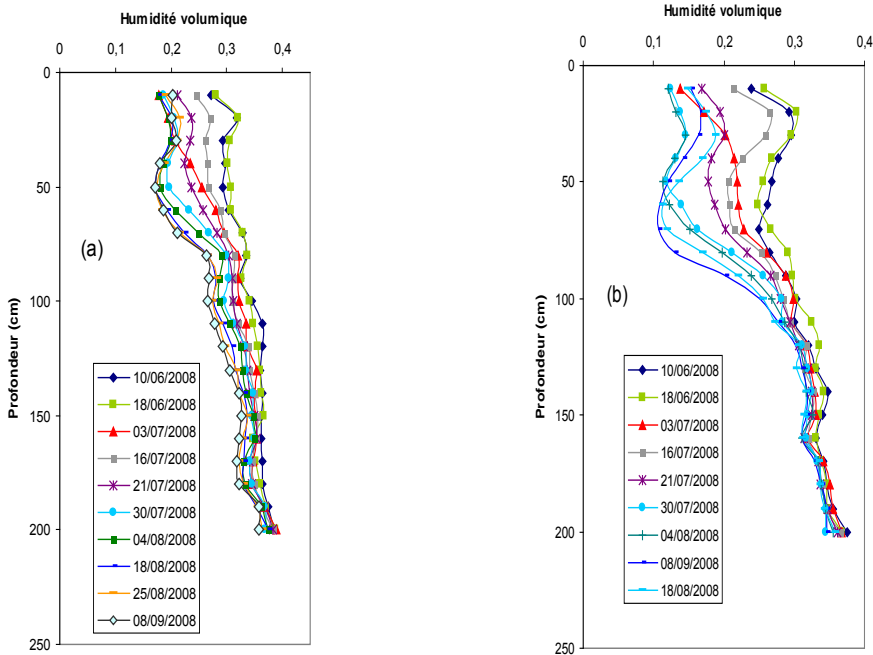


Fig.2. Profils d'humidité volumique sur le rang au cours de la campagne d'irrigation 2008 pour deux écartements entre gaines: (a) : $E_s = 1.20$ m (écartement entre rangs de maïs 0,6m) et (b) $E_s = 1.60$ m (écartement entre rangs de maïs 0,80m)

3.2 Simulation d'un scénario extrême

3.2.1. Simulations HYDRUS-2D

L'utilisation du Gag enterré dans les conditions d'un printemps sec (conditions exceptionnelles pour la bordure nord méditerranéenne, mais fort courantes pour la bordure sud, au Maghreb) suscite un légitime questionnement quant aux possibilités d'assurer la germination et la mise en place du système racinaire. Pour tenter d'y répondre, nous avons mis en œuvre une modélisation adaptée aux transferts bidirectionnels tels qu'ils se manifestent en présence d'une source linéaire (Sgaggs, et al., 2004) Les paramètres hydrodynamiques du sol alimentant le code numérique ont été identifiés par la méthode Beerkan (Lassabatière et al., 2006) sur la parcelle en 2007 (Mubarak et al., 2009b).

On a construit un scénario climatique tel que celui de 2008 dans lequel les pluies ont été éliminées. On a supposé les gaines installées à une profondeur de 35 cm et espacées de 1.6 m, les rangs de maïs étant quand à eux espacés de 0.8 m. Afin de vérifier s'il était possible d'apporter un taux d'humidité suffisant au voisinage des graines, un apport d'eau 2.5L/h/m (soit 1.56 mm/h) durant 37 h a été simulé au moyen du code numérique, soit un apport total de 55 mm environ. Le profil initial d'humidité est tel qu'il croît de $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^3$ au voisinage de la

surface et ce, linéairement avec la profondeur pour atteindre $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ à un mètre. Ce profil initial hétérogène, correspond à un stock voisin de 75% de la réserve utile. Le domaine simulé est un carré de 1.6m de coté pour intégrer les deux plans de flux nuls latéraux, à la base du profil on impose une condition de drainage libre. La simulation ne portant que sur 48 heures, on ne considère que l'évaporation du sol comme conditions à la surface. Celle-ci, au même titre que l'apport d'eau, étant introduite au pas de temps horaire (Mubarak et al., 2009b).

Le résultat de la simulation permet de constater que l'humidité volumique θ initialement égale à 0.15 atteint 0.25 à 9 cm de la surface du sol à la verticale du goutteur. Il est loin d'en être de même au niveau des graines de maïs lesquelles demeurent dans un environnement plutôt sec $0.10 < \theta < 0.15$ incapable de garantir la levée et par là même un quelconque développement en profondeur du système racinaire. Augmenter la durée d'arrosage ne servirait à rien compte tenu des propriétés hydrodynamiques du limon de Lavalette dont la longueur capillaire est voisine de 10 cm (Revol, et al., 1997; Mubarak et al., 2009a). La poursuite de l'apport accroîtrait alors les pertes d'eau par drainage.

Ce type de simulation met en évidence les limites d'un tel système en conditions de printemps sec. Sans équipement complémentaire, l'agriculteur ne peut assurer la levée de sa culture et court le risque de ne rien produire. Un équipement d'irrigation par aspersion serait nécessaire et pourrait être un canon enrouleur, appareil facilement déplaçable pouvant être loué à une coopérative ou emprunté. A défaut, un système d'asperseurs déplaçable peut également être utilisé. Dans tous les cas une irrigation d'au moins 35 mm est nécessaire pour assurer la levée. Toujours avec HYDRUS on montrerait qu'elle permet de maintenir un niveau d'humidité durant une période suffisamment longue pour permettre au système racinaire de se développer pour atteindre la profondeur permettant de bénéficier des apports du système enterré.

3.2.2. Simulations PILOTE

Le modèle PILOTE est utilisé pour estimer les économies d'eau possibles avec le Gag enterré par rapport à l'aspersion. On fera dans cette application l'hypothèse que les deux systèmes fonctionnent dans les conditions optimales et ont une efficacité de 100%. On sait qu'en réalité il n'en est pas ainsi et que l'efficacité optimale que peut garantir un enrouleur parfaitement réglé en conditions non ventées approche les 85% (Cemagref et al., 1999) alors que cette valeur est souvent atteinte et dépassée avec le système Gag (Clemens, 2002).

On utilise l'option pilotage automatique des arrosages en choisissant des doses de 35 mm en aspersion et de 5 mm en tout début de cycle puis de 10 mm pour le Gag. Le seuil choisi pour déclencher une irrigation est tel qu'il nous garantisse un rendement en grain de 15 T/ha. Sur le scénario virtuel de 2008 (zéro pluie sur le cycle) ce rendement est obtenu en aspersion moyennant un apport de 450 mm alors qu'en Gag enterré il requiert 380 mm auquel il faut ajouter les 35 mm permettant d'assurer la levée au moyen de l'aspersion soit un total de 415 mm. On économiserait donc 35 mm en utilisant le Gag enterré mais sous condition de pouvoir bénéficier du secours d'un dispositif d'aspersion.

Il va de soit que le choix entre un Gag de surface et Gag enterré milite en faveur du premier système lorsque de telles conditions climatiques deviennent fréquentes. L'extension de la tache humide en surface, résultat du "flaquage", à laquelle il convient de rajouter la longueur capillaire, permet d'assurer la levée pour une majorité de cultures.

La comparaison Gag vs aspersion se limite ici à l'aspect économie d'eau relative et ce relativement à une hypothèse bien particulière à savoir arrêt définitif des pluies avant fin Avril. Si cette hypothèse est parfaitement soutenable en rive sud de la méditerranée, elle l'est un peu moins en rive nord où l'occurrence de printemps humide est beaucoup plus élevée. Pour juger de l'intérêt économique de l'irrigation enterré il apparaît nécessaire d'intégrer la problématique du risque climatique en prenant en compte les contraintes au niveau de l'exploitation.

4. Conclusion

En aspersion, le SCV est un système de culture pouvant générer des économies d'eau. Une économie d'une trentaine de mm a été constatée sur le cas du maïs en 2007 pour un niveau de rendement équivalent. Les simulations de ce système sur une série climatique à Montpellier font état d'une économie possible d'une trentaine de mm en moyenne et d'un gain notable d'efficacité d'utilisation de l'eau par rapport au système conventionnel. Pour les traitements en sec de cette même année, le rendement en SCV est sensiblement supérieur à celui du CT (avec de plus un apport d'azote limité). Sur ces traitements en sec, l'évaporation du sol est plus importante car le LAI est faible. L'effet "mulch" revêt dans ce cas toute son importance dans la réduction de l'évaporation du sol, l'eau non évaporée étant alors transpirée.

En Gag, le rendement en 2008 obtenu sur parcelle plantée à raison de 8 plts/m² avec gaines enterrées espacées de 1.6m n'est pas significativement différent de celui obtenu sur parcelle plantée à raison de 10plts/m² avec gaines enterrées espacées de 1.2 m, ces deux parcelles ayant reçues une dose équivalente. Ce résultat obtenu en sol limoneux est à l'évidence intéressant d'un point de vue économique (moins de gaines à l'hectare). Concernant le profil d'humidité du sol, l'écartement des gaines à 1.60 m affiche clairement une plus forte contribution du sol à la satisfaction des besoins en eau de la plante.

L'application du modèle PILOTE au goutte à goutte de surface a été possible sur le cas des années ici testées en raison d'un LAI élevé au moment du déclenchement des irrigations rendant de ce fait l'évaporation négligeable et de l'absence de drainage. Pour le goutte à goutte enterré, une adaptation du modèle PILOTE a permis de montrer qu'il était possible de réaliser de substantielles économies d'eau par rapport à l'aspersion pour un objectif de production du maïs de 15 T/ha. Ces économies d'eau, de l'ordre de 350 m³/ha, équivalent à une dose d'irrigation par aspersion, soit un gain de 8%. Cependant, en cas de printemps sec, la simulation numérique montre que le recours à un système d'aspersion peut s'avérer nécessaire afin d'assurer la levée de la culture et permettre au système racinaire de bien s'installer en profondeur afin de bénéficier des apports du système enterré.

La combinaison d'un traitement SCV et d'une irrigation goutte à goutte avec une gaine enterrée à faible profondeur, du fait de l'absence de labour est actuellement en cours d'expérimentation. Ce système devrait permettre des économies d'eau supplémentaires; la modification de la structure du sol peut aussi induire des conditions plus favorables pour l'irrigation goutte à goutte à la levée qu'il convient de caractériser.

Le maintien d'une production agricole durable au Maghreb impose de rechercher les moyens d'une valorisation maximale des ressources rares et en particulier de l'eau. L'irrigation goutte à goutte et en particulier l'irrigation goutte à goutte enterrée étudiée ici pour la production du maïs grain est une technique intéressante mais les économies d'eau substantielle qu'elle procure sont obérées par les contraintes de la levée en cas d'absence de pluie au semis. La prise en compte du risque climatique s'avère nécessaire pour mener à bien une étude économique visant à juger de l'intérêt du Gag enterré en conditions méditerranéennes.

Références

Clemmens, A.J., 2002. Measuring and improving irrigation performance at the field level. Trans. of ASAE 22 (8) 89-96.

Cemagref, ETSI-UCLM, Silsoe College Cranford Univ., INRA, Cometal, Komet, FAIRI 1 CT 950088 (EU DG VI). NIWASAVE European project: Water Agric. and Envir. Interactions. Reducing the impacts of water application heterogeneity on: nitrates leaching, water losses and economic yields.

Khaledian, M.R, Mailhol, J.C, Ruelle, P., Rosique, P., 2008, Adapting PILOTE model for water

- and yield management under direct seeding system (DSM). The case of corn and durum wheat in mediterranean climate. *AGWAT*, (96), 757-770p.
- Khaledian, M.R., 2009. Semis direct sous couverture végétale (SCV) en climat méditerranéen. Thèse de doctorat UMII, 210p.
- Lassabatière, L., Angulo-Jaramillo, Soria Ulgalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., and Haverkamp, R., 2006. Beerkan estimation of soil transfert parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Sci., Soc Am., J.* (70) 521-532.
- Mailhol J.C., O. Olufayo, P. Ruelle 1997. AET and yields assessments based on the LAI simulation. Application to sorghum and sunflower crops. *Agricultural Water Management revue*,35(1997) 167-182p
- Mubarak, I, Mailhol, JC, Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P., Bouarfa, S. 2009a. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high –frequency drip irrigation . Accepted in *AGWAT*.
- Mubarak, I, Mailhol, JC, Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P. 2009b. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation» *GEODERMA* (150), 158-165p.
- Revol P., BE. Clothier, JC. Mailhol, G. Vachaud, and M. Vauclin (1997). Infiltration from a surface point source and drip irrigation. 2. An approximate time-dependent solution for wet-front position. *Water Resource Research* Vol. 33. No. 8 1869-1874p.
- 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).
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M. Th., 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *IGWMC-TPS 53*, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., Shouse, P. J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130(4): 304-310.