



Analyse de la Consommation en Eau dans les Différents Contextes d'Agriculture Irriguée

UR Irrigation Cemagref Montpellier

Avril 2003

J.C. Mailhol

Sommaire :

I- Objectif et problématique	3
II- La méthodologie adoptée	
1- Une culture phare : le maïs	
2- Le système d'irrigation et son matériel	4
III- Les processus et les termes du bilan hydrique	
IV- L'efficience de l'irrigation et sa variabilité selon les systèmes d'irrigation	8
1- Asperseurs fixes ou mobiles	9
2- L'enrouleur	10
3- Le pivot	
4- L'irrigation localisée	11
5- L'irrigation au bassin	12
6- L'irrigation à la raie	
V- Caractéristiques des matériels d'irrigation pris en compte dans le cadre de l'étude	14
1- La couverture intégrale	
2- Le canon enrouleur	15
3- Le pivot	16
4- Le goutte à goutte	17
5- La rampe à vanettes	18
VI – Mode de pilotage et pratiques d'irrigation	
VII Etudes de cas relatifs à une culture de maïs	20
1-Parcelle expérimentale de Lavalette au Cemagref (Montpellier)	
2-L'irrigation à la raie dans le S-E de la France	
3-Le canon enrouleur dans la Drôme	21
4-Les machines à irriguer dans le bassin Adour-Garonne	22
a- Le canon enrouleur sur sols superficiels en Charente	23
b- Le canon enrouleur en région toulousaine	25
c- Le pivot sur les sables des Landes	
3- Le canon enrouleur dans la Beauce	26
VIII- Le cas de l'irrigation localisée sur vergers	27
IX - Discussion et conclusion	29
Références	30

I- Objectif et problématique :

L'objectif de ce travail est d'évaluer les composantes majeures du bilan hydrique d'une culture irriguée selon un système : aspersion, gravitaire, ou localisé. De façon plus pragmatique il s'agit de pouvoir répondre à la question suivante : sachant que l'agriculteur apporte H mm d'eau sur sa parcelle quel pourcentage de cette quantité apportée est réellement utilisée par la plante. Si l'on appelle X cette quantité utilisée, $H-X$ se répartit essentiellement entre une partie demeurant stockée dans le sol, une partie qui ruisselle hors de limites du domaine irrigué, et/ou une partie 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 mais cependant délicates à estimer notamment en ce qui concerne cette dernière composante. En outre la question de savoir s'il convient de considérer ces dernières composantes comme des pertes pour la culture mérite réflexion selon de nombreux chercheurs.

Cette quantité X dépend du type de culture et pour une même culture peut être également variable suivant la variété. Par exemple, pour le maïs selon la variété (cycle court ou cycle long) cette quantité peut varier de 600 à 700 mm environ. En outre, selon où l'on se trouve (Latitude), cette quantité évapotranspirée, nécessaire pour atteindre les potentialités ne peut pas être toujours fournie par les conditions climatiques locales. Il convient à ce propos d'ajouter qu'une variété donnée requiert une somme de température sur son cycle lui permettant d'arriver à maturité. Dans certaines régions de France, il y a des années où la récolte du maïs à maturité est perturbée en raison d'une thermique sur le cycle défavorable. Il en résulte un retard de maturité et une perte de rendement ou une absence totale de récolte en raison de l'impraticabilité des parcelles dues aux fortes pluies d'Automne. Le choix même de variétés mieux adaptées aux contraintes locales ne garantit donc pas toujours des conditions de récoltes favorables au rendement espérés. C'est une des raisons pour lesquelles le chiffre précédent proposé pour le maïs présente une variabilité géographique à l'échelle d'un pays comme la France où cette culture a connu un essor considérable depuis plusieurs décennies.

II La Méthodologie adoptée

On envisage d'aborder cette étude de deux manières. La première consiste à analyser les résultats de travaux basés sur l'approche expérimentale que recèle la littérature. Notre expérience en ce domaine nous incite à penser que les résultats obtenus ne sont pas suffisants pour accéder aux différents termes du bilan en général. En effet, la mesure de l'efficacité de l'irrigation à l'échelle d'une parcelle est très délicate voire impossible comme l'explique Clemmens (2002) dans un article que nous analyserons ci après. Le drainage par exemple sous culture irriguée, est difficilement envisageable en dehors de l'utilisation de cases lysimétriques. L'estimation du drainage sous la zone racinaire nécessite la mise en place de tensiomètres, de tubes d'accès à la sonde à neutron ou d'autres équipements équivalents pour la mesure du stock hydrique et bien souvent la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du sol au niveau de la zone racinaire. 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 à mesurer le rendement de la culture sous différentes apports d'eau. En conséquence, la deuxième approche proposée est basée sur une modélisation dans laquelle nous nous efforcerons, quand cela sera possible de prendre en compte la pratique des agriculteurs dans un contexte pedo-climatique déterminé et pour un système d'irrigation choisi. Lorsque cette pratique nous sera inconnue il conviendra de faire des hypothèses d'apports d'eau sur la base d'information relevant d'enquêtes.

II.1 Une culture phare : le maïs :

Notre travail portera essentiellement sur le maïs culture dominante et la plus consommatrice en eau. Des exceptions seront toutefois faites pour certaines régions où la culture dominante n'est pas le maïs (exemple du pêcher irrigué en micro irrigation) où encore lorsque l'importance de cette culture est comparable à une autre aussi consommatrice en eau comme le maraîchage par exemple (cas des Landes). Il apparaît guère envisageable de pouvoir traiter toutes les régions de France. Aussi, nous focaliserons nous que sur celles où la consommation en eau pour l'agriculture est forte et /ou souvent sujette à conflits d'usages.

II.2. Le système d'irrigation et son matériel :

Eu égard à l'importance des pratiques d'irrigation dans la part respective des flux, il apparaît nécessaire de prendre en compte le type de matériel utilisé dans une système d'irrigation donné en fonction de sa représentativité dans le contexte français. Ainsi traiterons nous du canon associé à l'enrouleur qui en aspersion est l'appareil le plus largement utilisé. Son niveau d'efficacité est très variable en fonction des conditions d'utilisation (effet du vent, réglage des vitesses d'avancement,..) Nous traiterons également du cas du pivot, système beaucoup moins répandu en raison de ses contraintes d'utilisation liées en partie à la topographie, et la forme et dimension des parcelles mais réputé très efficace et de fait prédestiné à l'irrigation de certains types de sols.

Concernant l'irrigation localisée, jusqu'au milieu des années 90 la tendance demeurait très favorable au goutte à goutte. Le micro jet ou micro asperseur connaît-il un certain essor ces derniers temps notamment sur sols très filtrants. L'irrigation localisée est également réputée efficace. Mais il est très important d'ajouter que mal maîtrisée elle peut donner lieu à d'importants gaspillages d'eau un de ses intérêts majeurs pour l'irrigant résultant de ses possibilités d'automatisation et d'association à la fertilisation. Son usage est largement répandu en arboriculture, principalement le pêcher en raison des marges brutes dégagées par ce type de culture.

Enfin, en ce qui concerne le gravitaire, couvrant à peine 10% des superficies irriguées en France, il est essentiellement pratiqué dans le Sud-Est et dans les Pyrénées orientales. Nous nous intéresserons au cas de l'irrigation à la raie qui demeure la technique la plus répandue. Jusqu'au début des années 80 encore pratiquée de façon traditionnelle, cette technique a fait l'objet d'importants efforts de modernisation grâce à la généralisation de la technique de planage au laser et à l'usage de matériels modernes de distribution de l'eau en tête des raies (rampes à vannettes, gaines souples). L'introduction chez l'agriculteur de ce type de matériel a considérablement contribué à la réduction de la pénibilité du travail (Etude ARTHEMIS, DDA et al., 1989, et son actualisation Platon et Mailhol, 1995) et à améliorer de façon significative l'efficacité de l'irrigation (Clemmens, 2001, Fig.1).

III. Les processus et les termes du bilan hydrique

On désigne la quantité X sous le terme ETR : évapotranspiration réelle. Ce terme englobe la transpiration de la plante et l'évaporation du sol. Historiquement ces deux termes n'étaient pas dissociés même dans les publications de la FAO antérieures à Allen (1998). En toute rigueur l'évaporation du sol devrait être considérée comme une perte pour la culture étant donné qu'il ne contribue pas à son fonctionnement hydrique. A cet égard, bon nombre de modèles proposent une estimation de cette évaporation du sol qui selon certains auteurs oscille entre 10 et 20% selon le type de culture et le rythme des aspersion en début de cycle. Pour certaines cultures l'évaporation du sol peut être bénéfique notamment pour la germination, le contrôle des températures, la préparation du lit de semence, etc. Cependant par souci de simplification d'une part et en raison de l'importance de ce terme essentiellement marquée en début de cycle (lorsque la culture est peu couvrante) d'autre part, nous conviendrons de ne pas dissocier cette "perte" du terme consommation X .

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. Elles sont cependant lourdes et coûteuses à mettre en oeuvre au même titre que la méthode des cases lysimétriques donnant accès à tous les termes du bilan hydrique.

On peut estimer ETM au moyen de la formule $ETM = Kc \ ETP$ où Kc est le coefficient cultural et ETP l'évapotranspiration potentielle de référence 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 qui en France peut atteindre des valeurs maximales 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 s'échelonnant de fin Avril à fin Septembre pour des variétés à cycle court ou moyen et parfois jusqu'à fin Octobre pour des variétés à cycle long (ou variété à cycle moyen à court cultivées dans conditions thermiques peu favorables). Le coefficient Kc évolue au cours du cycle avec l'indice foliaire appelé LAI. Il est donc tributaire des conditions environnementales (thermiques essentiellement pour une culture bien fertilisée), et des modèles de cultures comme Stics (Brisson et al., 1998) ou Pilote Mailhol et al., 1997) permettent de simuler l'évolution du LAI et par là même celle du Kc .

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 1). Il décroît ensuite plus ou moins lentement (selon le niveau de disponibilité hydrique) au cours d'une période appelée sénescence après avoir atteint un 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. Quoique d'un point de vue théorique Kc soit borné supérieurement à 1, la littérature et bon nombre d'études ayant traité 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 Kc_{max} généralement proposées pour le maïs varient de 1.15 à 1.2 en zones cultivées sous nos latitudes.

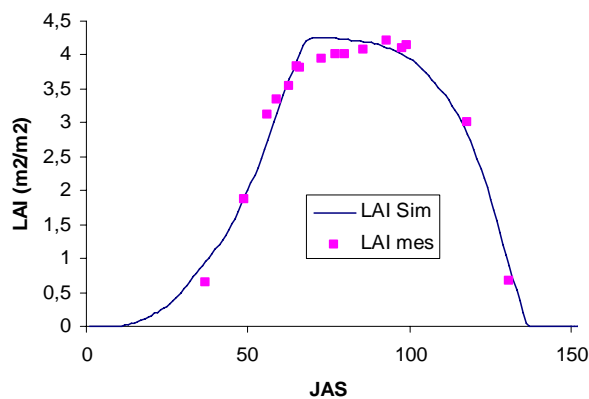


Figure 1. Exemple d'évolution du LAI du maïs conduit à l'ETM sur la parcelle de Lavalette en 1998 (Simulation par le modèle PILOTE et observations ponctuelles)

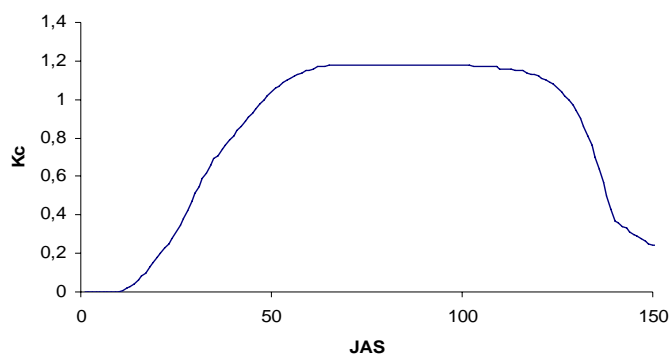


Figure 2. Evolution du Kc du maïs conduit à l'ETM à Lavalette en 1998

Certains chercheurs se sont intéressés à la part de l'eau perdue par évaporation (interceptée par le végétal) dans le cas d'une irrigation par aspersion effectuée de jour sous forte demande climatique. Les avis cependant divergent sur l'importance de ce terme du bilan. Selon Huber, (1992), elles seraient de l'ordre de 5% pour les conditions climatiques de l'Europe. Certains chercheurs considèrent cette valeur négligeable donnant comme argument que le fait d'arroser en plein jour réduit le pouvoir évaporant de l'air et de ce fait l'évapotranspiration. D'autres s'accordent à dire qu'un couvert végétal bien développé modifie significativement le schéma de distribution de la pluviométrie entre le toit du couvert et la surface du sol. Steiner et al. (1983) sur le cas du maïs (écartement de rangs = 0.76 m, densité de plantation 53 000 plants/ha) sous pivot affirment que 47% de l'eau apportée atteint la surface du sol en s'écoulant le long des tiges. Plus récemment De Boer et al., (2001) affirment, sur la base d'expérimentations sur maïs plantés à raison de 80000 plants/ha que l'on doit s'attendre à ce que environ 70% de la quantité totale apportée par aspersion atteigne le sol dans une bande de 20 cm de large contenant les plants de maïs. Ces 70% constituent essentiellement l'écoulement le long des tiges. Comme les hauteurs de pluviométrie mesurées entre les rangs (et au milieu) représentent d'après ces auteurs environ 50 %, on est en droit d'en conclure que la quantité demeurant sur le feuillage susceptible d'être évaporée paraît de ce fait très faible pour ne pas dire négligeable.

Selon Khol et al., (1987), les fabricants de matériels d'aspersion indiquent des pertes allant de 10 à 20% depuis la buse jusqu'au couvert végétal selon le type d'asperseur, la pression de fonctionnement et les conditions de vent (Yazar, 1980). Ces pertes résulteraient de l'effet conjoint de la traînée due au vent et de l'évaporation, ce dernier facteur étant le plus prépondérant. Afin d'apporter quelques éclaircissements relatifs à la grande dispersion des chiffres proposés par la littérature relatif aux pertes par évaporation dans le transport aérien de l'eau, des essais ont été effectués au champ par ces mêmes auteurs. Ces essais attestent de pertes par évaporation inférieures à 1.5% même sous températures élevées et en conditions ventées. Notons que dans les régions sujettes au vent il est généralement recommandé aux agriculteurs d'attendre la nuit pour irriguer où le vent source majeure d'hétérogénéité en aspersion, se calme la plupart du temps. Selon les considérations qui précèdent le bilan hydrique d'une culture peut être ainsi formulé :

$$R(t) = R(t-1) + P + I - ETR - D + R_c - R_{uis} \quad (1)$$

, où R représente la réserve en eau du sol sur la profondeur racinaire maximale P_x , t le temps (en général le pas de temps est au minimum journalier), P et I respectivement pluie et irrigation, l'eau perdue par drainage au delà de la limite exploitable par les racines, et R_c les remontées capillaires. Ce dernier terme est difficilement quantifiable pour les mêmes raisons que pour D, évoquées précédemment. La plupart des chercheurs s'accordent à dire que dans le cas d'une culture conduite sans restriction hydrique importante et en l'absence de nappe phréatique au voisinage de la zone racinaire, le terme R_c peut être considéré négligeable. Le terme R_{uis} , le ruissellement, est certes accessible au niveau du m^2 de surface correspondant au site de mesure, il en va cependant bien autrement au niveau de la parcelle hormis le cas d'une parcelle en gravitaire de pente homogène et dotée d'un fossé récupérant les eaux de ruissellement. Aussi dans bien des situations où la parcelle est supposée à peu près plane ce terme est généralement négligé en raison de son estimation guère fiable au moyen de la modélisation. Ainsi, la connaissance de la variation du stock hydrique accessible au moyen de l'humidimètre à neutron ou à défaut par prélèvement d'échantillons de sols à la tarière et dont l'humidité est déterminée par passage à l'étuve, permet d'estimer le terme ETR lorsque le dispositif expérimental (batterie de tensiomètres) permet de s'assurer que le drainage (ou le terme R_c) est nul sur l'intervalle de temps considéré.

Cette équation (1) est à la base de la plupart des modèles de bilan hydrique plus ou moins sophistiqués. Leur principe repose sur le concept de réservoir (Cf Fig. 3) dont la capacité R_{max} est égale au produit d'un paramètre caractérisant le sol quant à ses potentialités hydriques, RU : réserve utile (mm/m), par la profondeur de sol mobilisée par les racines. On définit la réserve utile comme la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ (h_{cc}) : quantité d'eau qu'un sol peut retenir après avoir été arrosé jusqu'à saturation et la teneur en eau au point de flétrissement permanent (h_{pf}) : quantité d'eau restant dans le sol non accessible par la plante.

Le sol est alors géré comme un réservoir dans lequel la plante s'alimente. Lorsque ce dernier déborde, en l'absence de pente ($R_{uis} = 0$) : $R(t) - R_{max} = D$, à la fin du pas de temps on pose donc $R(t) = R_{max}$. Sur une parcelle en pente la difficulté consiste à faire la part entre ce qui ruisselle et ce qui draine. On définit aussi un concept agro-climatique qui est la RFU : réserve facilement utilisable. Selon ce concept la plante prélève sans restriction à l'ETM tant qu'il y a de l'eau disponible dans ce compartiment du réservoir sol dont la capacité est égale à K_r . RU, K_r étant compris entre 0.5 et 0.7 selon le contexte climatique (régime d'ETP) et le type de culture d'après Dorembos et Kassam, (1979). Une valeur souvent proposée pour K_r est 2/3. On définit R_s (réserve de survie) = $RU - RFU$.

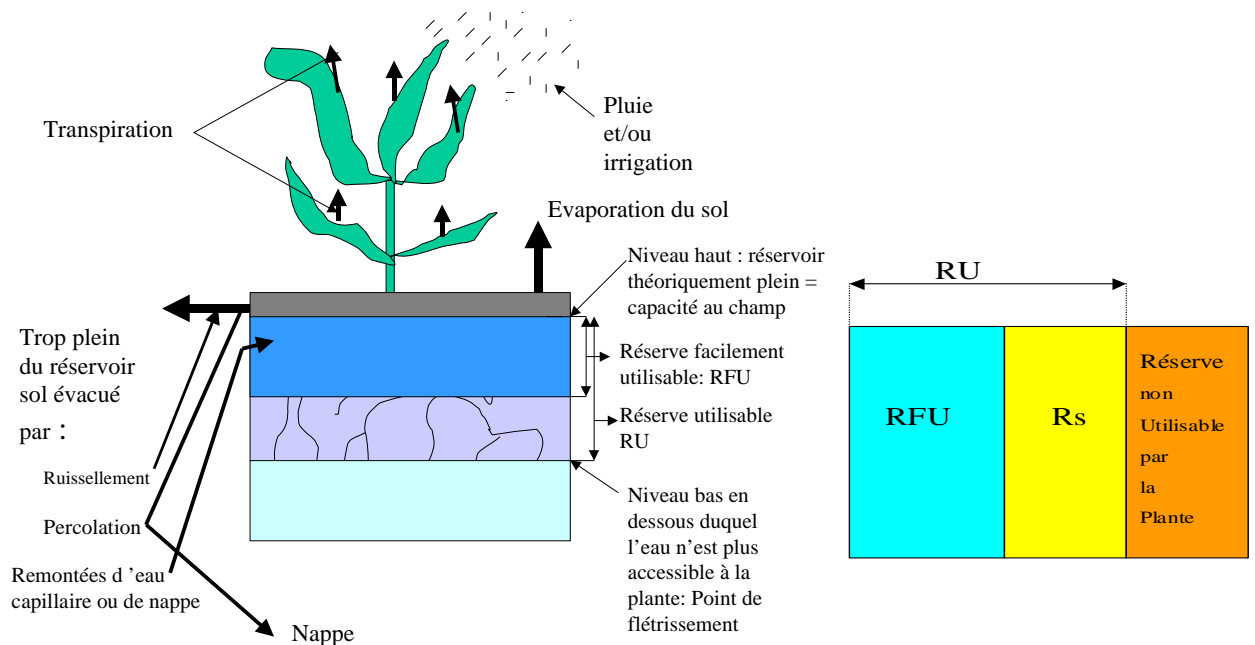


Figure 3. Représentation du bilan hydrique selon le concept du réservoir sol

L'estimation de ces différentes composantes du bilan hydrique appelées flux d'eau permet d'accéder à l'efficacité du système d'irrigation. Cette efficacité dépend à l'évidence de la pratique de l'agriculteur notamment des doses qu'il utilise et de la fréquence d'application de ces doses. Elle dépend aussi du contexte pédo-climatique du type de culture et du système d'apport d'eau. Ces facteurs ont un impact plus ou moins accentué sur la stratégie (fréquence-doses) de l'irrigant soucieux d'économiser l'eau. La définition de l'efficacité ou efficacité de l'irrigation dépend de l'échelle à laquelle on se place et de l'usage de l'eau. Au niveau d'une parcelle, cette efficacité ne se définit pas de la même façon selon l'origine de l'eau servant à l'irriguer et la destinée de l'eau échappant au système racinaire. L'exemple de l'agriculteur réutilisant les eaux de ruissellement alimentant les fossés de colatures, dans le cas du gravitaire, ou pour celui qui dispose d'un forage puisant l'eau de la nappe qu'il recharge par excès de drainage sous aspersion en constitue en effet une bonne illustration de ce propos. A l'échelle du périmètre des pratiques d'irrigation générant des pertes par percolation excessives peuvent en effet contribuer au maintien d'un niveau piézométrique favorable à d'autres systèmes d'irrigation ou d'autre type d'usages de l'eau. A ce stade il convient cependant de se montrer prudent dans ce genre de propos car d'un point de vue environnemental le drainage est hélas souvent synonyme de transfert de soluté et par conséquent de pollution de nappe.

Concernant le travail à effectuer il s'agit bien de caractériser l'efficacité au niveau de la parcelle sans préjuger du devenir de l'eau "perdue" pour la dite parcelle. L'estimation de la part consommée par la plante relève du domaine de l'agronomie. Depuis quelques décennies la quantité d'eau qu'il est nécessaire de fournir à une culture donnée pour que celle-ci atteigne ses potentialités de production sont assez bien connues. Cela peut à l'évidence nous amener à conclure de ce fait que la connaissance des apports sur le cycle cultural nous permet de connaître la quantité d'eau susceptible de retourner au milieu naturel dans un contexte pedo-climatique donné. Des limitations majeures à cette approche doivent être cependant explicitées. Tout d'abord la connaissance des doses apportées est hélas dans la plupart des cas très imprécise. Ensuite, l'état des réserves hydriques initiales des sols est mal connu en début de cycle au même titre que certaines conditions environnementales. La pluviométrie par exemple affiche une certaine variabilité spatiale importante durant une saison estivale donnée et inter-annuelle. Cette pluie hélas l'agriculteur ne peut la prévoir cela a bien évidemment des conséquences sur les risques de drainage et de lessivage d'azote lorsque par manque de chance une forte pluie se produit le lendemain même d'une irrigation. Il faut ajouter aussi que la thermique régissant la croissance affiche également une variabilité inter-annuelle. Au niveau même d'une parcelle la variabilité des doses délivrées n'est pas l'apanage d'un système gravitaire mal maîtrisé, l'aspersion notamment dans le cas du canon enrouleur peut engendrer des doses très hétérogènes en conditions ventées comme le montre l'étude NIWASAVE (Cemagref et al., 1999) réalisée dans le cadre d'un projet européen. Un mauvais réglage du matériel (vitesse d'avancée du canon), son usure (cas de la couverture intégrale en aspersion) ou son colmatage (cas des goutteurs ou des micro-jets en irrigation localisée) sont également des sources importantes de variabilité des doses et des pertes d'efficacité. Ce phénomène peut encore être exacerbé quand il se conjugue à une forte hétérogénéité des sols. Face à ce problème la tendance actuelle de la recherche est à l'irrigation de précision, laquelle se propose d'apporter une dose adaptée à un endroit bien identifié de la parcelle (A. Zanolini, 2003)

Des scénarios climatiques types, appliqués à des sols de caractéristiques bien définies permettent via une modélisation du système eau-sol-plante-atmosphère d'estimer les différents termes du bilan hydrique. De nombreux travaux permettent d'accorder une certaine crédibilité aux résultats de ces modèles. Cependant force est de reconnaître que les résultats qu'ils proposent n'ont de valeur que dans la mesure où les données d'entrée principalement les doses et leur fréquence sont connues. C'est la raison pour laquelle une estimation des flux à l'échelle d'une parcelle ou d'un îlot irrigué ne peut être guère précise sans une connaissance de la pratique de l'agriculteur. De nombreuses études avaient du reste fait état de la nécessité de créer des observatoires régionaux des pratiques d'irrigation.

IV. L'efficacité de l'irrigation et sa variabilité selon les systèmes d'irrigation

Dans un article récent (2002) le chercheur américain Clemmens (du Water Conservation Laboratory : Phoenix Arizona) évoque la difficulté à estimer l'efficacité de l'irrigation à l'échelle d'une parcelle. Il partage tout à fait notre point de vue concernant son estimation à savoir le recours à la modélisation. Cet article se propose en outre de redéfinir le concept d'efficacité. 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'efficacité 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 (quelquefois il s'agit de la dose apportée au dernier quart de la parcelle dans le cas de l'irrigation à la raie) 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 dans la zone racinaire.

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.

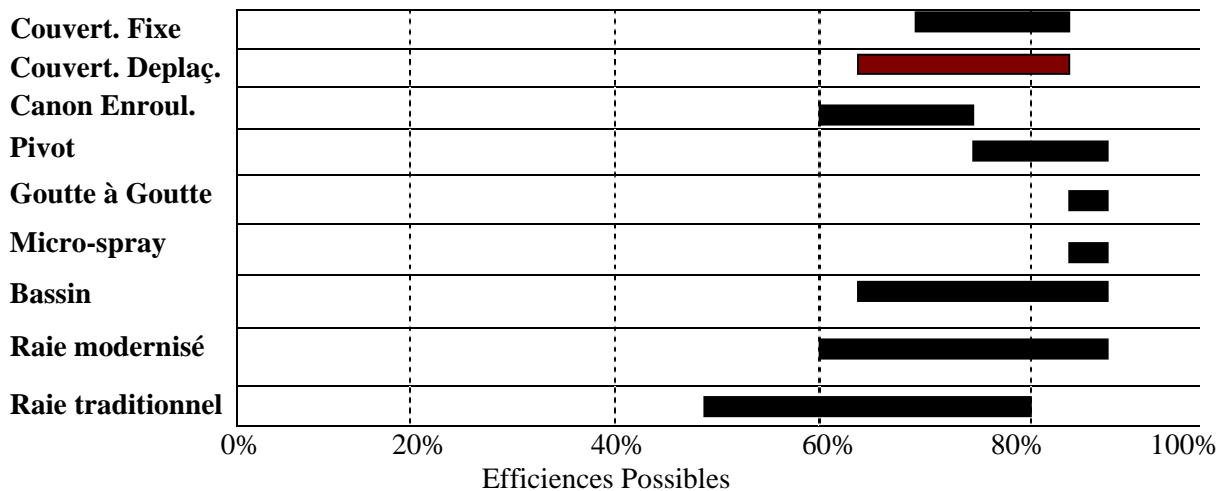


Figure 4 : Efficacités d'application possibles pour différents systèmes d'irrigation utilisés en France (d'après Clemens, 2002).

IV.1. 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 (Fig. 6) 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

IV.2.L'enrouleur

Le canon enrouleur (Fig.8) 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	30
10-20% différence	
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

IV.3 Le pivot

Le pivot (Fig.9) est le système permettant d'obtenir de très bonnes efficacités. Comparativement aux systèmes précédents la qualité de ses performances est beaucoup moins sensible au vent. L'homogénéité des doses et la possibilité de les réduire à de faibles valeurs (15 mm) minimise considérablement le drainage et les risques de lessivage d'azote sur sols superficiels ou ayant de faibles potentialités hydriques tels les sols sableux (Landes) ou les sols superficiels caillouteux (Charente, Champagne....)

IV. 4. L'irrigation localisée

Comme son nom l'indique l'irrigation localisée se propose d'apporter l'eau dans l'environnement le plus immédiat de la plante afin de constituer un bulbe humide (Fig 13 et Fig. 14) enveloppant son système racinaire. Parmi les systèmes que l'on rencontre, le goutte à goutte (Fig 10) demeure le plus répandu. On constate cependant que la micro aspersion prend de plus en plus d'importance en raison d'une meilleure adaptabilité aux diverses conditions de sol. Quant à la micro-irrigation enterrée réalisée au moyen de gaines munies d'orifices elle est relativement peu utilisée en France concernant des cultures spécifiques comme l'asperge.

La fourchette de variation du goutte à goutte ou du micro asperseur, proposée à la figure 4, nous semble trop étroite, même si l'on admet que les irrigants des USA maîtrisent mieux la technique que les agriculteurs des pays où cette technique a été plus récemment implantée. Des informations issues d'enquêtes réalisées par la SCP (Peyremorte : communication orale) attestent de gaspillages d'eau selon cette technique encore mal maîtrisée par bon nombre d'agriculteurs. Des enquêtes réalisées par le CIRAD font état d'importants gaspillages d'eau en irrigation localisée sur canne à sucre à la Réunion, les apports étant très largement excédentaires par rapport aux besoins (Fusillier, J.L., Saque, C., 2001). Alors, l'efficacité du localisé est-elle un mythe ou une réalité ? L'uniformité de ce système dépend comme pour l'aspersion, de l'installation du système, de la qualité des goutteurs et du dispositif de filtration de l'eau notamment et de leur entretien. Blaine (1987) évoque 86% comme limite basse de l'efficacité pour des conditions de coefficients de variation de 8% du débit du goutteur (borne haute pour le fabricant). Il cite cependant de mauvaises efficacités constatées à la suite d'enquêtes effectuées chez des agriculteurs californiens. Sur 57 systèmes testés, 17 % auraient une uniformité supérieure à 90%, 61% une uniformité comprise entre 70 et 90%, et 21% une uniformité inférieure à 70%. Pits et al. (1996), faisant référence à 174 systèmes de micro-irrigation aux USA, fait état de coefficients d'uniformité d'arrosage de 70% en moyenne avec 75% de cas où ce coefficient est inférieur à 85%. Comme l'ont constaté Revol et al, (1995), la cause de ces faibles uniformités résulte de la mauvaise qualité de l'eau de la filtration et de la variabilité excessive des goutteurs. Le problème de l'uniformité d'apport en micro irrigation affecte les possibilités d'économie d'eau du système au même titre que la productivité. A ce titre Santos (1996) montre que le meilleur rendement pour la tomate (près de 102 t/ha) est atteint avec un apport de 470 mm quand l'uniformité est de 90% alors que l'on constate que ce rendement tombe à 85 t/ha avec 500 mm lorsque l'uniformité chute à 60%. On constate que le revenu maximum est de 12% plus élevé dans le premier cas.

Sur vergers, la tendance actuelle est au micro asperseur sous frondaison. Les contraintes de filtration sont moins importantes et les risques de percolation résultant de l'impossibilité de maintenir un bulbe humide (cas des sols très filtrants) sont quasi inexistantes. En outre ce système est mieux adapté à certaines cultures nécessitant un degré d'hygrométrie élevé comme le kiwi par exemple. Les apports, contrairement au goutte à goutte, sont beaucoup plus espacés dans le temps. En moyenne, la fréquence est de deux apports par semaine et les débits peuvent aller de 100 à 300L/h. environ alors que la gamme des débits d'un goutteur est de 2 à 8 L/h. Les apports en goutte à goutte commencent tôt dans la saison. Cela favorise la formation et le maintien du bulbe humide. Certains vont même jusqu'à utiliser l'aspersion ou le gravitaire pour bien recharger le sol en humidité avant la mise en route de l'irrigation localisée. Le souci de maintien de ce bulbe humide est la raison pour laquelle l'agriculteur, comme on le lui conseille, n'interrompt pas son irrigation lors d'une pluie, sauf si celle-ci dure plusieurs jours et s'avère importante. Les apports sont généralement modulés durant la saison. En période de pointe (Juillet-Août) où les Etp peuvent atteindre 6 à 7 mm/j les arrosages peuvent durer 8 h, s'agissant par exemple de goutteurs irrigant des arbres dont les rangées sont espacées de 2.5 m et les arbres d'une même rangée de 1m. Un goutteur entre 2 arbres est alors affecté à une surface de 2.5

m². Dans ce cas, un débit de 4 L/h pendant 8 h permet d'assurer la demande climatique (6.4 mm) en période de pointe. Il s'agit là d'un cas de densité de plantation extrême (arbres en espalier tels que pommiers ou poiriers, ou kiwis) où l'on souhaite limiter le développement de l'arbre. Dans la plupart des cas et notamment pour des conditions nécessitant un espacement conséquent (oliviers, dattiers, ou autres), le volume en litre à délivrer quotidiennement à l'arbre s'obtient en multipliant l'Etp journalière par la superficie du sol à l'aplomb du système foliaire (10 à 20 m² selon les types arbres).

IV.5. Le cas du bassin

L'irrigation par bassin n'est pas pratiquée en France à l'exception des zones de riziculture. Son niveau d'efficacité peut être élevé (> 90% selon Blaine (19897)) à conditions toutefois de disposer à la fois d'un très bon nivellement et d'un débit d'apport très élevé de l'ordre de 500 à 600 L/s pour des parcelles de 150 m de coté.

IV.6. Le cas de l'irrigation à la raie :

L'uniformité de l'irrigation à la raie dépend du temps requis par l'eau pour atteindre l'extrémité aval de la parcelle (temps d'avancement) et de la variabilité des conditions d'infiltration du sol. En raison de ce temps d'avancement la durée d'infiltration est variable entre l'amont et l'aval de la parcelle causant une hétérogénéité de la dose infiltrée comme l'illustre le schéma de la figure 5 ci après.

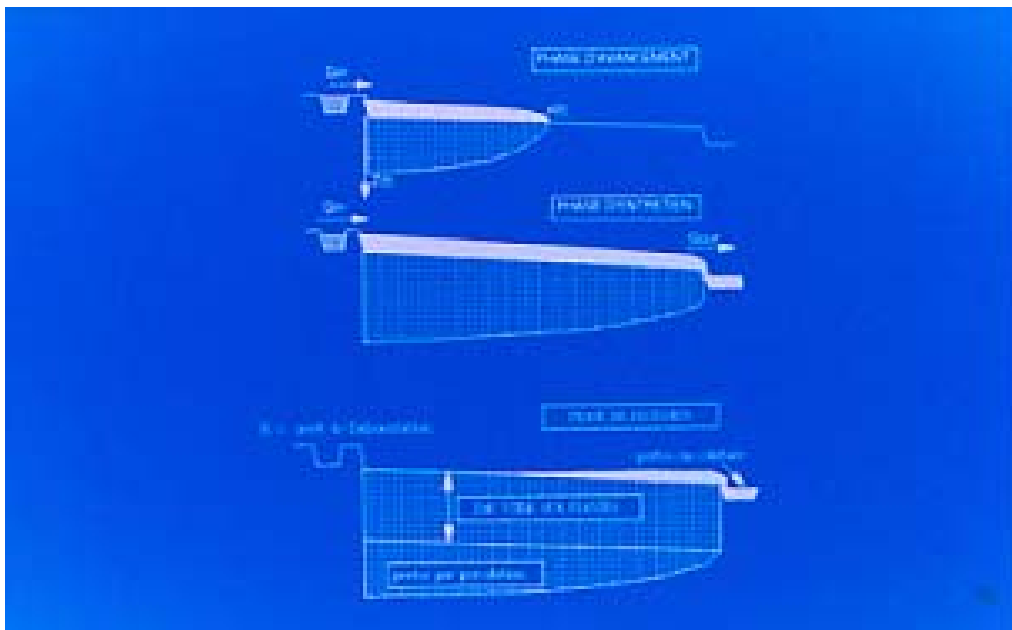


Figure 5. Les 3 phases d'une irrigation à la raie : Avancement, entretien, récession.

On peut réduire cette hétérogénéité en augmentant le débit, en réduisant la longueur de ruissellement (longueur du champ), ou en augmentant la pente. Toutes ces mesures réduisent le temps d'avancement. Le déficit de saturation des sols ayant dans bons nombres de situations un effet majeur sur le temps d'avancement (TA), accroître les fréquences d'arrosages, quand cela est possibles, contribue à réduire TA (Mailhol et al., 1999). Le problème n'est cependant pas si simple car réduire le

temps d'avancement, donc améliorer l'uniformité, contribue dans bien des cas à accroître le volume de ruissellement comme on peut le comprendre à partir du schéma de la figure 6 ci après :



Figure 6. Illustration des critères de performance en irrigation à la raie (R_n est aussi appelé efficacité)

Si ce volume peut être recyclé ou réutilisé pour la parcelle aval, l'efficacité globale peut être bonne et les pertes par drainage faibles ($D < 20\%$), mais tel n'est pas toujours le cas. Un exemple californien montre qu'une réduction de la longueur des parcelles de 800 à 600 m, en adaptant les temps d'irrigation, permet de passer d'une uniformité de 80 à 89% et de réduire ainsi le drainage (ou percolation profonde) de 50%. Le ruissellement (ou pertes en colatures) par contre augmente de 75%. Des essais dans les mêmes conditions montrent qu'il est préférable d'augmenter le débit alimentant les raies 2.2 L/s à 3.5 L/s. L'uniformité maximale susceptible d'être atteinte est cependant limitée par la variabilité des conditions d'infiltration au sein de la parcelle. Plusieurs études sur la variabilité de l'infiltration attestent d'une gamme de variation de l'uniformité d'environ 70%. Ceci peut représenter une limite haute d'après Blaine (1987) compte tenu du fait que les sols sur lesquels s'appuient ces essais sont relativement homogènes du point de vue de leur texture. L'uniformité réelle du système, pourrait être inférieure à 70% résultant à la fois de la mauvaise uniformité de la dose d'eau apportée imputable à la variabilité du sol et à la différence des temps d'infiltrations. Dans ce cas, les pertes par drainage seraient évaluées à 30%. Des techniques telles que l'irrigation à double débit (débit fort pendant l'avancement, puis faible pendant la phase d'entretien) ou encore l'irrigation par vagues ont été développées et appliquées aux USA où un marché des automatismes en irrigation de surface est rentable. De nombreuses études s'accordent à montrer l'efficacité de ces conduites, notamment concernant l'irrigation par vagues, pour améliorer de façon très significatives l'uniformité et réduire les pertes par drainage surtout lors du premier arrosage. Certaines d'entre elles montrent que l'on peut réduire de 33% la quantité d'eau apportée durant la phase d'avancement par rapport à une conduite traditionnelle. En France, les parcelles en gravitaire excèdent rarement les 300 m. C'est certes une des raisons pour lesquelles cette technique ne s'est pas avérée très convaincante quant à son efficacité suite à quelques essais effectués par la société du canal de Provence en collaboration avec le Cemagref. Sur des parcelles de longueur inférieures à 300 m, la raie bouchée pourrait être recommandée dans des contextes où les orages durant le cycles sont quasi nuls ou dans le cas de cultures peu sensibles aux excès d'eau. L'efficacité globale s'en trouverait considérablement améliorée du fait de la suppression du ruissellement aval. La plupart des irrigants du SE de la France ne pratiquent d'ailleurs pas l'irrigation avec colatures, ce qui les dispense de l'entretien des fossés récupérant les eaux de ruissellement. Cependant, la forte variabilité de l'avancement inter raies que l'on peut dans certains cas observer génère des risques de drainage locaux aval importants (raies les

plus rapides) ou des zones sous irriguées (raies les plus lentes) selon la durée choisie pour l'arrosage (Mailhol, 2001). Ce n'est qu'au pris d'un temps de présence conséquent passé à réguler le débits dans les différentes raies que l'on peut s'affranchir de ce problème. Mais on devine alors que ce genre d'action ne s'inscrit guère dans une logique de modernisation visant avant tout de réduire la pénibilité du travail. En France l'effort de modernisation du gravitaire a essentiellement porté sur l'acquisition de matériel permettant de délivrer l'eau en tête des raies tels que la gaine souple ou la rampe à vannettes, le siphon étant jusque là l'unique matériel témoignant d'un souci d'évolution des pratiques. Ce dernier est encore utilisé dans de nombreux pays en raison de son coût incomparablement plus faible que celui des matériel précédemment cités. La technique du laser rotatif a aussi contribué à l'amélioration des performances du gravitaire. Cependant, en raison d'une très bonne disponibilité en eau, les avantages apportés par ces matériels ont été beaucoup plus manifestes au niveau du gain de main d'œuvre qu'au niveau gain d'efficacité (ARTEMIS, DDA et al., 1989). En outre, en dépit des recommandations faites, le nombre d'agriculteurs soucieux de mesurer le débits entrant dans leur parcelle leur permettant d'estimer la dose apportée est hélas encore trop faible.

Des études ont eu pour objectif de comparer les efficacités de différents systèmes d'irrigation. La plus part hélas manquent sérieusement d'objectivité, certains de ces systèmes se trouvant le plus souvent dans des conditions ne supportant pas la comparaison. Il est dans ce cas évident de conclure que l'irrigation à la raie consomme beaucoup plus d'eau que l'irrigation localisée.

Le pilotage des irrigations réduit les pertes par drainage dans la mesure où un meilleur timing diminue le nombre des arrosages et où une meilleure estimation du niveau d'épuisement des réserves en eau du sol peut réduire aussi la dose moyenne appliquée. Nous reviendrons ultérieurement plus en détail sur cet aspect de l'irrigation qu'est le pilotage.

V. Caractéristiques des matériels d'irrigation pris en compte dans le cadre de l'étude

V.1. La couverture intégrale

Ce système consiste à disposer sur la parcelle en début de campagne, un réseau superficiel de rampes de petit diamètre, le long desquelles sont installés des asperseurs. La mise en eau successive des postes d'arrosage, qui peuvent comprendre une ou plusieurs rampes en fonctionnement simultané, est réalisé par l'ouverture ou la fermeture de petites vannes en tête de chaque rampe. Ces vannes peuvent être commandées de manière manuelle ou automatique. Le dispositif des asperseurs permet d'obtenir une bonne uniformité de l'apport d'eau par recoupement des jets. Les asperseurs sont usuellement disposés en carré, rectangle ou en triangle dont les dimensions les plus courantes sont 18x18 ; 18x24 ; 21x21 m, la première dimension de chaque couple étant celle de l'espacement des asperseurs sur la rampe, la seconde celle de l'écartement entre deux rampes contiguës. Les effets du vent sur l'hétérogénéité d'apport se fait ressentir dès que celui-ci atteint les 10 km/h. L'irrigation devient pratiquement impossible dès que cette vitesse atteint 30 km/h. On atténue l'effet du vent en adoptant un dispositif le plus serré possible en triangle de préférence. Le triangle 18x18 est souvent préconisé. C'est la configuration utilisée sur la parcelle expérimentale de Lavalette au Cemagref. La couverture intégrale est un système bien adapté à toutes les formes de parcelle tous les types de sols et à toutes les cultures.

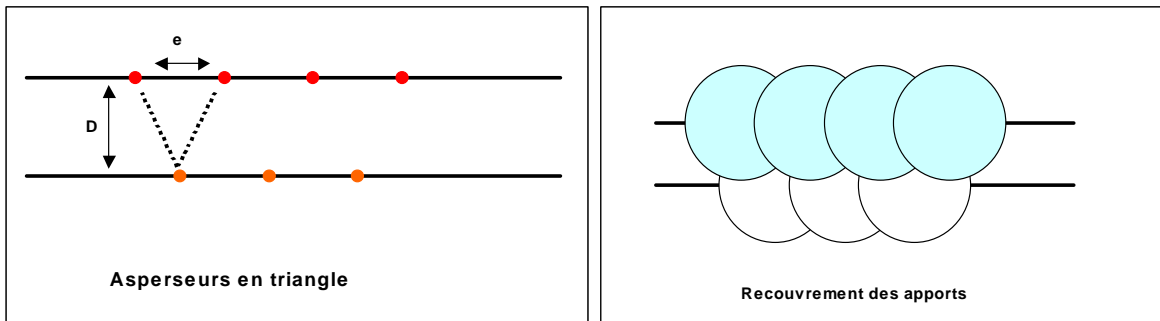


Figure 7. La couverture intégrale avec un exemple de dispositif des asperseurs (en triangle)

V.2. Le canon enrouleur



Figure 8. Le canon enrouleur

En aspersion, l'enrouleur est le matériel le plus utilisé : près de 80% des surfaces arrosées en aspersion, en France, le sont par enrouleur. Cependant en raison d'un choix pas toujours judicieux de son équipement, d'une mauvaise implantation dans le parcellaire et des difficultés liées au réglage de l'appareil, l'enrouleur est souvent considéré comme un appareil d'arrosage médiocre (Dubalenne, 1993). Son succès résulte de sa grande souplesse d'utilisation et des investissements réduits qu'il nécessite. Cependant bien utilisé des efficacités de 80 à 85 %, donc supérieures à la borne haute présentée à la figure 4, peuvent être fréquemment atteintes notamment comme précédemment évoqué à la faveur d'une régulation automatique

Le type d'enrouleur utilisé dans le cadre de notre étude est l'enrouleur 82 dont le canon est équipé d'une buse conique de 22 mm fonctionnant sous 5 bars (la pression à la borne étant supposée à 10 bars). Le débit d'équipement est de 40 m³/h. La largeur de bande irriguée par passage est de 75 m pour un vent ne dépassant pas les 10 km/h.

V.3. Le pivot

Le pivot aussi appelé rampe pivotante est un appareil mobile, arrosant en rotation une surface circulaire ou semi-circulaire. Il est en général à poste fixe, mais il peut être conçu pour être déplacé d'un poste à l'autre. Le pivot s'est d'abord développé dans les zones plates des Landes sur des parcelles de grande taille (jusqu'à 200 ha) . Il se développe de plus en plus sur des parcelles plus petites et dont la pente peut atteindre 15% grâce à des solutions déplaçables et avec possibilité d'épandages de fertilisants et de pesticides. D'un point de vue économique, la longueur idéale d'un pivot est de 450 m, soit une parcelle de 65 ha environ. L'intérêt de ce type d'appareil est sa simplicité de mise en œuvre, ses possibilités de fonctionnement automatique et ses performances en terme d'uniformité d'apport d'eau.

Le pivot est constitué par une canalisation de grande longueur, tournant autour d'un axe par lequel se fait l'arrivée d'eau et l'électricité. Cette canalisation est portée de proche en proche par des tours équipées de roues, animées par des moteurs électriques. Les tours séparent l'appareil en travées rigidifiées par un système de triangulation et des tirants, la canalisation tenant lieu de poutre. L'eau est distribuée par des asperseurs ou des buses disposées le long de la canalisation. Un canon d'extrémité, placé au bout du porte -à -faux complète souvent l'équipement. Le mouvement de la rampe est discontinu, l'alignement de l'ensemble est commandé au niveau de chaque tour par des contacteurs, sensibles à l'angle formé par deux travées contiguës. Le réglage de la vitesse d'avancement se fait par modification du temps de fonctionnement du moteur de la dernière tour, au cours d'un cycle d'une minute.



Figure 9. Le pivot

Nous sommes placés dans les conditions d'un pivot de 450 m de longueur fonctionnant selon un cercle complet et susceptible d'apporter une dose journalière maximale D_j de 5 mm. Le débit d'équipement est alors de 132.5 m³/h. La réserve utile des sols dans les landes est faible nous avons convenu d'apporter des doses par passage ne dépassant pas $D_m = 25$ mm. Le tour d'eau qui est l'intervalle de temps séparant deux arrosages est en principe calculé aux différentes périodes de la campagne en tenant compte de la dose D_j de chaque période et non systématiquement à partir de la dose journalière de pointe D_j . Le tour d'eau peut alors être défini par :

$$T \leq D_m/D_j$$

Pour respecter le tour d'eau fixé on règle l'avancement de la machine (A_v) en % de la vitesse maximum :

$$A_v(\%) = T_r/T \cdot 100$$

, avec T_r : temps minimal mis par l'appareil pour effectuer une rotation complète à vitesse maximale de la dernière tour,

$$T_r = 2\pi L/V_m$$

,avec L : distance entre le pivot et la dernière tour, et V_m vitesse maximale d'avancement de la dernière tour. Dans le cas de notre pivot la dernière tour est à $L = 400$ m de l'élément central et capable d'avancer à $V_m = 150$ m/h, apportant $D_j = 5$ mm/j. La durée du tour d'eau est 5 jours et le temps de rotation à vitesse maximum est $T_r = 16.7$ h.. La vitesse d'avancement qu'il convient de respecter est $A_v = 14\%$.

V.4. Le goutte à goutte

Sa caractéristique majeure est de n'arroser qu'une fraction du sol. Il utilise de faibles débits avec de faibles pressions. Il met en œuvre des équipements fixes et légers, ne mouille pas le feuillage et convient bien à l'irrigation fertilisante. Il est totalement indépendant des autres interventions sur la culture et impose dans la plupart des cas l'automatisation car nécessite souvent des apports fréquents et fractionnés. On le rencontre surtout les systèmes de cultures à l'exception des grandes cultures qui ne permettent pas de rentabiliser l'équipement nécessaire. Un goutteur (Fig. 10) peut avoir un débit compris entre 2 et 8L/h. Les plus courants fonctionnent cependant entre 2 et 4 L/h et sont très exigeant au niveau de la qualité de l'eau. C'est la raison pour laquelle un système de filtration efficace est la plupart du temps obligatoire.



Figure 10. Un exemple de goutteur

V.5. La rampe à vannettes (Figure 11):

Elle se compose d'une série de tuyaux en PVC de 6 m de longueur emboîtés les uns dans les autres et traités contre les UV de diamètre 250 mm. Le long de la génératrice des orifices rectangulaires (32x64 mm) ont été découpés à la scie sauteuse. Sur ces orifices sont montés des vannettes coulissantes permettant de régler l'ouverture et donc le débit d'alimentation des raies. Bien installé, et à condition de respecter une charge résiduelle en tête de conduite d'au moins 30 à 40 cm, le coefficient d'uniformité de distribution du débit alimentant les raies peut atteindre 5% (Trout, 1990, Mailhol et al., 1999). L'autre type de matériel commercialisé en France est la gaine souple. Il s'agit d'un tuyau souple de diamètre 250 mm traité contre les UV, percé d'orifices à l'emporte pièce sur lesquels s'emboîte un manchon muni d'un robinet à son extrémité assurant le réglage du débit. L'avantage de ce système par rapport au précédent est de pouvoir être franchi par les engins réalisant des traitements durant la campagne. Son inconvénient majeur résulte de la difficulté à obtenir un réglage garantissant une bonne uniformité de la distribution.



Figure 11. La rampe à vannettes

VI. Mode de pilotage et pratiques des irrigations :

Des travaux ont été réalisés par différents organismes de recherche et développement visant à proposer aux agriculteurs des méthodes de pilotage de leurs irrigations (méthodes permettant de juger de l'opportunité d'irriguer). Parmi ces méthodes la tensiométrie et la méthode du bilan hydrique sont considérées comme étant les plus opérationnelles. Les contraintes liées au désamorçage des

tensiomètres et la difficulté de mise en fonctionnement efficace d'un système d'avertissement aux irrigants par minitel ont conduit à l'abandon de ces techniques destinées essentiellement à l'aspersion.

Dans le cadre de l'opération IRRI-MIEUX, un état des lieux des actions de conseil et d'appui technique en irrigation a été effectué sous l'encadrement de spécialistes de différents organismes (Chambres Régionales d'Agriculture, ARDEPI, GITEP). Les critiques formulées à l'encontre de ses actions de conseil au pilotage (basé essentiellement sur le bilan hydrique avec appui quelquefois de la tensiométrie) mettent l'accent sur le caractère hétérogènes et le plus souvent impersonnel de ces actions dénommées "conseil de masse". Il semble cependant difficile de procéder différemment qu'en se basant sur des parcelles de références pour assurer le conseil aux irrigants généralement diffusé chaque semaine au moyen du courrier postal, du fax et de plus en plus par E-mail. C'est donc la méthode type parcelle de référence qui a été en effet adoptée dans le cadre de cette opération. Des parcelles de références (sur maïs) ont été équipées en tensiomètres (4 par parcelles) dans certaines régions. Un suivi des stades d'évolution des cultures permet après interprétation des relevés tensiométriques de mieux raisonner les irrigations et notamment de décider de la fin des irrigations. En parallèle à la tensiométrie, la méthode du bilan hydrique (simulateur COGITO) est appliquée à chaque parcelle de référence. Avant la diffusion du message aux irrigants le conseiller s'assure de la convergence des deux méthodes en terme de préconisation. L'ensemble des informations nécessaires au calcul du bilan hydrique est transmis dans l'avertissement et les irrigants destinataires ont également à leur disposition une grille de calcul de leur bilan hydrique. Après avoir été sensibilisés en début de campagne sur la manière de renseigner leur grille les irrigants peuvent alors utiliser les informations transmises pour individualiser le traitement de celles-ci. Ainsi dans certaines régions une représentation graphique de ce bilan hydrique permet aux destinataires de visualiser le degré de recharge de la réserve utile du sol et de juger de l'opportunité de déclencher, ou poursuivre l'irrigation. A ce titre le conseil recommande de déclencher l'irrigation lorsqu'il reste 10 mm consommables dans la RFU. Dans d'autres régions le bilan hydrique est recalé par des mesures de l'humidité du sol sur les parcelles de références. Ce bilan hydrique est dans certains cas utilisé de façon prévisionnelle sur la base de la moyenne des ETP des 12 dernières années sur la période correspondante. Enfin une approche allant dans le sens de l'individualisation, consiste à envoyer en début de campagne aux irrigants une grille de calcul du bilan hydrique leur permettant, à partir des données restituées dans l'avertissement, de calculer la dynamique d'épuisement de leur réserve selon la formule classique : $RFU_{fin} = RFU_{initiale} + Pluie + irrigation - ETP$. Notons également le système IRIVOV proposé par ARVALI-Institut du végétal. Il s'agit d'un système équivalent de pilotage des irrigations permettant de gérer un ensemble de parcelles aux caractéristiques de sols voisines, intégrées dans un tour d'eau. Il repose sur quatre principes :

- 1- détermination au champ des stades repères de la culture permettant de borner la période d'irrigation et d'appliquer les règles de conduites.
- 2- Proposition du rythme "dose fréquence" adapté aux conditions de l'année sur la base de données tensiométriques.
- 3- Proposition de seuils tensiométriques pour déclencher la 1^{ère} irrigation et la modulation dose-fréquence (seuils tenant compte du tour d'eau)
- 4- Un ensemble de règles précises pour l'utilisation de la tensiométrie.

La Société du Canal de Provence avait mis au point un système comparable à la méthode du bilan hydrique appelé BILANEAUMETRE qui présentait l'avantage de personnaliser (caractéristiques du sol de la parcelle prises en compte) cette approche du bilan hydrique, l'ETP étant une donnée de référence moyenne pour la période considérée. Cette méthode n'a pas eu cependant le succès escompté et a été remplacé par une utilisation informatisée "IRISA". Il est vrai qu'étant donnée la place de plus en plus prépondérante qu'occupe l'informatique dans tous les domaines de la vie, l'irrigant doté d'un pluviomètre dispose de moyens lui permettant de gérer les irrigations de ses parcelles. La publication par la météorologie locale des données relatives aux ETP de la dernière décennie, ne pourrait qu'accroître l'efficacité de ces méthodes de pilotage. Quelques systèmes de pilotage automatique des irrigations en goutte à goutte (Humicro) ont toutefois été installés, pour la plupart en stations d'essais régionales (Mas d'Aspor BRL, CEHM, Marsillargues).

Une des raisons majeures du peu d'intérêt des méthodes de pilotage, autres que celles évoquées, résulte du fait que l'agriculteur raisonne au niveau de l'exploitation et non au niveau de la

parcelle. L'organisation du travail et les diverses contraintes souvent liées à la disponibilité du matériel ou l'accessibilité à l'eau (périodes d'interdictions d'irriguées par exemple) pèsent lourdement sur la prise de décision d'irriguer. Cette prise de décision ne peut donc être influencée uniquement par des critères agro-climatologiques. Le niveau d'équipement et les règles de priorité qu'il adopte caractérisent un type d'agriculteur. Une typologie des exploitations à l'échelle d'une région élaborée à la faveur d'enquêtes sur les pratiques d'irrigation et d'essais est un élément contribuant à une meilleure connaissance de la demande en eau à cette échelle. Cette typologie a été effectuée par le Cemagref en région Charente avant la mise en fonctionnement du barrage de Mas Chaban. Il convient de s'interroger quant aux conséquences de la mise en fonction de ce barrage sur un éventuel changement de stratégie d'irriguer de la part des agriculteurs.

VII Etudes de cas relatifs à la culture phare : le maïs

VII.1. Parcelle expérimentale au Cemagref à Lavalette :

Mise en place au début des années 90 la parcelle expérimentale de Lavalette au Cemagref de Montpellier a permis d'étudier l'estimation des flux sous les principales grandes cultures avec à l'origine le test de techniques de pilotage des irrigations. C'est un des rares contextes expérimental en France où l'installation et le suivi d'un dispositif instrumental permet une évaluation satisfaisante des différents termes du bilan hydrique avec notamment la détermination de la consommation maximale de la plante caractérisée par son ETM. Ce contexte est évidemment propice au calage et à la validation de modèles de cultures ce qui a été particulièrement le cas pour le modèle PILOTE (Mailhol et al., 1997). Concernant le cas du maïs on a pu montrer que dans le contexte d'un sol profond à bonne réserve utile (Ru de 150 à 180 mm/m) il suffisait d'apporter (aspersion couverture intégrale Fig 7) 300 mm en année moyenne pour avoisiner le rendement potentiel (145 qx/ha pour la variété semi-précoce SAMSARA) et ce, avec un risque quasi nul de drainage durant le cycle. Ces 300 mm auxquels on additionne une contribution du sol de 150 mm et une pluviométrie de l'ordre de 100 mm sur le cycle (Mai à début Septembre) permettent donc d'approcher le besoin en eau potentiel du maïs qui est très voisin de 600 mm. L'ETM sur une chronique de plus de 10 années (90-2002) affiche une valeur moyenne de 610 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 majeure chez l'agriculteur.

VII.2 Le cas de l'irrigation à la raie dans le S-E de la France :

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 l'irrigation avec colatures (fossés collecteurs des eaux de ruissellement à l'aval des parcelles). 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 (Ru \cong 150 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 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 ayant fait l'objet d'enquêtes, 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%) selon le modèle d'irrigation à la raie RAIEOPT (Mailhol, 1992, Mailhol et al., 1997), calé et validé dans différents contextes de sols. Les rendements obtenus en maïs sont souvent élevés, de 120 à 140 qx/ha (Tron et al, 1987).

L'étude à laquelle nous nous référons ne fait pas état de la pratique du gravitaire sur une culture réputée très consommatrice en eau : le foin de Crau. Celui ci est irrigué au calan ou à la planche, c'est à dire par ruissellement/submersion. Néanmoins, les chiffres moyens établis à partir d'une chronique de 21 années (1975-1995) que l'on peut avancer concernant cette culture sont de 750 mm en besoin potentiel (ETM) d'Avril à fin Octobre, les valeurs de K_c étant issues du bulletin de la FAO n° 24 selon une hypothèse de 5 coupes. En prenant en compte la contribution du sol et des pluies le modèle de bilan hydrique PILOTE nous donne un besoin en eau moyen voisin de 550 mm. Pour un sol de réserve utile moyenne ($R_u = 100$ mm/m).

VII.3. Le cas du canon enrouleur dans la Drome

De l'étude portant sur l'impact des changements climatiques. (Gonzalez, 2002) il ressort que les besoins en eau moyens potentiels du maïs qui représente pas loin de 60% de l'assolement, varient de 280 mm en sols profonds à 390 mm en sols superficiels. La culture de tomate qui ne représente que 10% de l'assolement est sensiblement plus consommatrice en eau que le maïs. Les risques de drainage en sols superficiels durant la période d'irrigation sont de l'ordre de 40 mm en année moyenne. Ils sont généralement consécutifs à une pluie intervenant peu de temps après une irrigation plutôt qu'à l'irrigation elle même. Les simulations effectuées sur sols profonds dans le cadre du projet NIWASAVE sur un échantillon de 21 années (1975-95) donnent pour dose cumulée moyenne 250 mm, la valeur moyenne du coefficient d'uniformité étant de 88%. Les doses annuelles sont très variables selon les années climatiques (140 à 320 mm) du fait de la règle des reports d'irrigation adoptée par les irrigants en cas de pluie. Le rendement moyen est de 118 qx/ha, très voisin de la moyenne régionale. Le drainage s'opère principalement pendant l'inter culture à l'exception de certaines années très pluvieuses en fin de culture (année 1993). Le drainage moyen durant l'inter culture est corrélé aux pluies automnales donc indépendant du cumul de l'irrigation. Des hétérogénéités apparaissent au sein de la parcelle pendant la culture lors des années humides : les sols profonds sont souvent à la limite de la saturation. L'apport due à la pluie étant uniforme, l'apport d'eau d'irrigation supplémentaire tend à saturer les zones de la parcelle les plus irriguées. Cela explique les variations de drainage au sein de la parcelle selon la dose d'irrigation certaines années (1976 et 1993). Mais même si une part du drainage peut varier sur la parcelle du fait de l'irrigation, elle est peu importante. Le drainage est donc peu lié aux apports d'eau d'irrigation, il est homogène sur la parcelle, la variabilité à l'échelle de la parcelle peut être manifeste les années où la pluviométrie est importante pendant le cycle de culture.

Les Tableaux 3 et 4 consignent des résultats de simulations dans le cas d'une année moyenne (1978) et d'une année humide en fin de cycle (1993) sur sol superficiel et sur sol profond respectivement. Les valeurs de drainage et de pluies font référence à la période des irrigations

s'étendant de la mi Mai au début Septembre en moyenne, la maturité certaines années pouvant n'être atteinte qu'au début Octobre.

Les rendements simulés sont dans la fourchette des rendements observés dans la région (105 à 125 qx/ha). Quand aux doses totales, elles sont également conformes aux observations la borne supérieures de 300 mm correspondant à la valeur maximale sujette actuellement à discussion dans le cadre du SAGE Drome. Les ETM atteignent et dépassent quant à elles les 630 mm hormis certaines années humides durant le cycle (1992). On notera une évaporation plus élevée dans le contexte des sols superficiels en raison à la fois de la fréquence des irrigations et d'un plus faible LAI.

Tableau 3. Cas des sols superficiels (Doses 25 mm fréquence 7 jours + règle pluie)

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1978	250	113	550	642	40	190
1993	300	110	574	660	150	320

Tableau 4. Cas des sols profonds (Doses 35 mm fréquence 10 jours + règle pluie)

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1978	210	122	530	640	0	190
1993	310	124	540	673	110	320

VII.4. Le cas des machines à irriguer dans le bassin Adour-Garonne

L'étude réalisée par le Cemagref en 1992 à la demande de l'Agence de l'Eau Adour –Garonne propose une cartographie des besoins en eau des principales grandes cultures ainsi que celle des ratio de rendements pour un volume d'eau disponible donné. Ces résultats quoique évidemment théoriques constituent une référence pour ce bassin couvrant une large part du territoire national. Ces besoins théoriques ont cependant fait l'objet d'une validation ponctuelle sur la base d'enquêtes ou d'études effectuées dans certaines parties du bassin (Picheral, 1994, Mailhol et Picheral, 1994). Ces enquêtes ont par ailleurs permis de comprendre de façon sommaire l'attitude de l'irrigant selon qu'il se trouvait ou non confronté à un problème de pénurie d'eau. On a en effet constaté qu'en en années sèches sous l'effet de certaines contraintes liées à disponibilité de la ressource et du matériel, l'agriculteur avait tendance à apporter une quantité d'eau égale à $R \cdot ETM$, ETM le volume d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins en eau de la culture et garantir le rendement maximal et R un coefficient voisin 0.7. On a par contre constater qu'en années humides ce coefficient avait tendance à atteindre des valeurs de l'ordre de 1.15 à 1.2. Ces différentes études ainsi que celles consultées à titre de validation ne font absolument pas état des données relatives aux flux de drainage qu'ils soient mesurés ou simulés. Dans ce qui suit nous nous proposons d'évaluer les principaux termes du bilan hydrique sur quelques cas type du bassin Adour-Garonne prenant en compte le matériel d'irrigation et les pratiques d'irrigation.

VII 4.a- Le canon enrouleur sur sols superficiels en Charente (Référence Climatique : Civray).

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. Cette simulation effectuée sur l'ensemble du cycle cultural au moyen du modèle simulant l'enrouleur 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 superficiels ($RU \cong 30$ mm/m) avec un écart type de 30 mm (Tableau 5). Les coefficients d'uniformité sont en moyenne de 85% (Ruelle et al., 2002), 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 profonds ($Ru > 100$ 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 12) une tendance chez l'agriculteur 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 moyens théoriques estimés à 280 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 2 besoins théoriques et apports sont très voisins.

L'ETM moyenne sur les 10 années étudiées est de 620 mm 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.

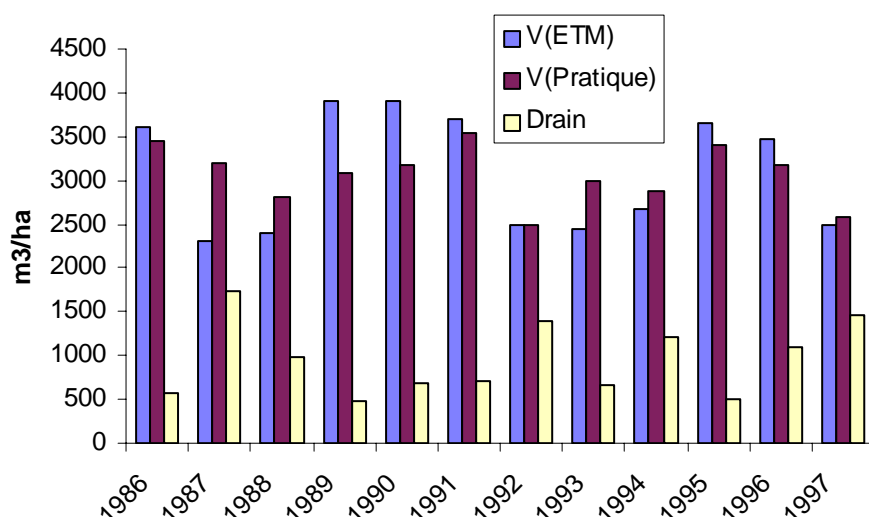


Figure 12. Comparaison des volumes d'eau consommés selon la pratique de référence avec ceux nécessaires pour satisfaire les besoins à l'ETM

La simulation illustre bien que même sur sols superficiels une technique basée sur le pilotage des irrigations peut conduire l'irrigant à faire des économies d'eau et à réduire le drainage et par là même les risques environnementaux. Si le canon enrouleur est largement représenté comme du reste dans beaucoup de régions de France, on rencontre des pivots et la couverture intégrale. Certains agriculteurs de Charente sur des exploitations importantes bien équipés ont à leur disposition ces 3 systèmes

Tableau 5 Comparaison de la pratique réelle (mode fréquentiel) d'arrosage à l'enrouleur sur sol superficiel avec une pratique basée sur le pilotage des irrigations (C_v = coef. de variation)

Ans	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)						
	V m3/ha	Rt T/ha	Cv %	Drain m3/ha	V m3/ha	Rt T/ha	Cv %	Drain m3/ha	Disponibi. (date en jas)	Nj	Déb. irrig. (jas)
1986	3450	12.6	3	600	2880	11.5	2	360	4(62), 6(122)		56
1987	3200	12.0	1	1740	1960	10.5	8	1270	1(114)		72
1988	2800	12.0	3	1000	2300	11.6	5	960	12(73)		67
1989	3080	12.6	2	500	3080	12.7	2	4400	2(70)		19
1990	3170	7.8	4	700	2500	6.0	4	480	5(75)		51
1991	3540	11.1	3	700	2880	11.4	2	410	26(45)		39
1992	2500	11.4	2	1400	1960	10.8	6	1000	29(31),19(67)		25
1993	3000	13.2	1	660	2200	12.8	3	400	1(95)		69
1994	2880	11.8	2	1200	2000	11.0	8	660	4(126)		57
1995	3400	10.3	2	500	3100	10.5	3	390	4(73)		60
1996	3170	10.3	3	1090	2540	9.4	7	330	5(79)		53
1997	2590	13.3	1	1500	2017	12.0	5	1350	23(58)		47
Moy.	3060	11.5	2.3	1000	2450	10.8	4.5	670			51
E.typ	310	1.5		400	420	1.7		360			16

VII.4b. Le canon enrouleur en région toulousaine (Réf. Climatologie Toulouse-Blagnac)

En référence à l'article de Cabelguenne et al., (1982) ayant traité 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 traité 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 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 6. 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

VII.4c. Le pivot dans les Landes en sols sableux (Ref : Climatologie Mont de Marsan)

L'usage du pivot est très répandu dans les sables des Landes qu'il s'agisse d'irriguer le maïs ou le maraîchage. Topographie, forme et dimensions des parcelles sont les critères retenus pour décider de l'usage de ce type de matériel. La particularité du pivot de pouvoir apporter de faibles doses explique son usage important dans la région sableuse des Landes. Les équipements sont généralement sur-dimensionnés pour pallier les risques de pertes par évaporation (10%) et les risques (15%) éventuels de pannes (Molle, 1998). Cela signifie que les besoins en eau des cultures pourront être quasiment toujours satisfaits même en conditions extrêmes car il n'y a pas de contrainte sur la ressource en eau. En effet, les agriculteurs prélèvent dans une nappe importante, peu profonde (20 m), et impropre à la consommation humaine en raison d'un taux élevé en fer.

Les sables des Landes ont une faible capacité de stockage hydrique. Les réserves utiles sont peu élevées (RU de l'ordre 50 à 60 mm/m) ainsi que les profondeurs exploitables par les racines en raison de la présence d'une couche de sol "taparas" limitant l'enracinement maximal P_x ($50 < P_x <$

60 cm). Les doses pratiquées n'excèdent pas 25 mm par irrigation, les temps d'arrêts du pivot variant de 3 à 7 jours en fonction de la grandeur des parcelles. Dans certains cas des doses journalières de 7 à 10 mm peuvent être apportées lors de 3 passages consécutifs, le pivot pouvant évoluer à 150m/heure. Le démarrage des irrigations est en règle générale aux environs de la première décade de Juin. Le GRCETA, qui suit par tensiomètre quelques parcelles de référence, avertit les irrigants. Cependant il peut arriver qu'une irrigation pour favoriser la levée soit nécessaire en début Mai. Les règles d'attente en cas de pluie sont comparables à celle des sols superficiels de Charente 1 jour par 7 mm de pluie. Le rythme des tours d'eau est de 5 à 6 jours en période de pointe et en l'absence de pluies significatives. Les besoins en eau moyen du maïs dans les landes sont de l'ordre de 250 mm (Etude Adour Garonne, Cemagref, 1992). Avec des périodes de semis qui s'étalent du 15 au 30 Avril des ETM de 600 à 700 mm peuvent être atteinte sur 150 à 160 jours selon les variétés de maïs à l'exception d'une année humide comme 92. En l'absence de pluies des doses de l'ordre de 25 mm (en 3 rotations : 1J/rotation du pivot) sont apportées tous les 5 à 6 jours en moyenne.

Le tableau 7 consigne le résultat des simulations pour le cas d'une année très sèche (1989), humide (92) et moyenne (95). Le démarrage des irrigation a été fixé au 10 Juin pour les années 89 et 95, le printemps ayant été assez pluvieux. En revanche, le temps ayant été relativement sec jusque à la fin Mai en 92, on a dû irriguer plus tôt : 1^{ère} décade de Mai pour assurer la levée. Les irrigations proprement dites n'ont débuté qu'à partir du 15 Juillet en raison d'une pluviométrie abondante avant cette date là.

Les rendements moyens en maïs sous pivot dans les Landes atteignent largement les 130 qx, selon le GRCETA, les variétés de maïs utilisées étant plus productives (R^{max} 160qx) que la variété SAMSARA (R^{max} = 145qx), leurs besoins en cumul de température pour atteindre la maturité étant plus élevés. La valeur élevée des rendements résulte de l'important investissement qu'exige ce système d'irrigation fonctionnant en quasi permanence en dehors des périodes de pluies significatives. Les apports sont en conséquence élevés (même en années moyennes) hormis les années exceptionnellement pluvieuses sur une large partie du cycle comme en 92. Les agriculteurs ne souhaitent pas courir le risque de démarrer trop tard leurs irrigations. En outre, celles-ci s'effectuent tout au long du cycle sur un sol dont la RFU n'est pas toujours totalement épuisée.

Tableau 7 Simulation pivot sur maïs en sols sableux des Landes

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1989	400	140	530	640	38	144
1992	200	120	460	560	133	491
1995	350	125	495	630	132	186

Comme on peut le constater le drainage est assez élevé sur la période d'irrigation sur ces sols à faible réserve utile. Compte tenu de la faiblesse des doses apportées les pluies survenant après irrigation sont en majeure partie à l'origine de ce drainage.

VII.5. Le Canon enrouleur en Beauce (Région: de Villemblain)

Dans le cadre de la thèse d'Anne Zanolin qui traite de l'intérêt de mettre en œuvre l'irrigation de précision dans le contexte d'une grande parcelle au sol hétérogène irriguée par pivot, on montre expérimentation et simulation à l'appuis [Modèle de culture : Stics (Brisson et al, 1998) et Modèle PILOTE] que sur les zones au sol profond de la parcelle, la technique du pivot sur maïs permet d'obtenir des rendement élevés ($R_t > 110$ qx/ha) avec des apports de l'ordre de 120 à 140 mm en moyenne et ce, sans drainage significatif durant le cycle. Il faut cependant des quantités plus élevées (180 à 220 mm en moyenne) pour atteindre des niveaux de rendement comparables sur sols superficiels avec des risques de drainage significatifs (30 mm en moyenne) et ce, malgré des doses de 25 mm. Sur le cycle, il est assez fréquent que les précipitations atteignent et dépassent les 300 mm et

que quelquefois le choix d'une variété de maïs à durée moyenne de cycle donne lieu à une récolte bien avant maturité avec un impact évident sur le niveau de rendement. Les ETM moyennes que l'on simule dans le cas d'une variété semis précoce comme SAMSARA avoisinent les 620 mm. Les tableaux 8 et 9 donnent un exemple de résultats de simulations effectuée sur 4 années en sols profonds et superficiels. On constate que des niveaux de rendements comparables peuvent être obtenus mais en mobilisant des volumes d'eau beaucoup plus élevés en sols superficiels.

Tableau 8. Sols profonds

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1993	100	96	536	626	37	308
1994	90	123	540	613	0	370
1995	140	111	498	620	0	257
1998	140	114	493	643	0	215

Tableau 9. Sols superficiels

Années	Irrigation (mm)	Rendement (qx/ha)	ETR (mm)	ETM(mm)	Drainage (mm)	Pluie (mm)
1993	200	102	500	628	50	308
1994	145	122	500	613	20	370
1995	200	107	470	620	20	257
1998	220	116	493	643	20	215

VIII. Le cas de l'irrigation localisée sur vergers

D'après l'article de Revol et al., (1995) qui fait une synthèse des pratiques d'irrigation localisée sur vergers, le goutte à goutte reste majoritaire parmi les équipements de micro irrigation et certaines installations donnent satisfaction depuis plus de 10 ans. Depuis peu, on observe toutefois une tendance vers le micro asperseur pour les raisons précédemment évoquées. En irrigation localisée, selon Revol et al., (1995), le principal problème rencontré est la filtration de l'eau dans le cas d'installations utilisant l'eau de surface. Un équipement classique en goutteurs espacés de 1 m en double ligne sur pêchers (culture dans le SE la plus irriguée avec ce système) donne lieu à un débit de 2 L/h (débit nominal). La durée maximum d'un poste est de 10 heures. La distance de plantation est de 3m x 5.5 m. L'apport maximum est donc en principe de 7 mm/j (120 l/arbre/jour). Cependant la pression réelle du réseau ne permet pas toujours d'apporter ce débit nominal et les risques de colmatage peuvent dans certains cas faire chuter cet apport à 3.5 mm/j (60 L/j :arbre) soit un écart de 50% par rapport à l'apport théorique.

Le débit nominal des goutteurs le plus courants est de 2 ou 4L/h. La conductivité hydraulique des sols est quelquefois trop faible par rapport au goutteur choisi. Il peut en résulter la formation d'une flaque avec risque de ruissellement. Il convient alors de fractionner les apports en évitant de réduire la dose journalière, ce que savent en général faire les irrigants. Certains agriculteurs affichent une certaine crainte de perdre de l'eau par percolation dans le cas de sols dits très filtrants. L'usage de la fertilisation rend cette crainte très légitime. Sur sol filtrants tels par exemple les sols caillouteux des costières du Gard, on constate, modélisation à l'appui, une forte élongation du bulbe sous goutteur avec une faible diffusion latérale. Le fractionnement des apports est aussi de règle sur ce type de sols (5 apports en 10 heures). Les expérimentations chez les agriculteurs ont toutefois montré que sur ces sols à risques (de percolation), un apports journalier de 10 L par goutteur (3.5 mm) nettement inférieur à la demande climatique (6.5 mm/J) limitait à 40 cm la profondeur des bulbes, cet apport d'eau inférieur à la demande climatique étant intégralement consommé.

Le fait important constaté est que 2% seulement du volume du sol exploité par les racines permet à l'arbre de consommer 54% de l'ETP (évapotranspiration). Les propriétés hydrauliques des

sols sont certes importantes pour expliquer les pertes par percolation en goutte à goutte, mais c'est d'abord le rapport entre l'irrigation et le déficit naturel qui est déterminant. Seul le pilotage tensiométrique permet de moduler les apports pour éviter ces pertes mais peu d'agriculteurs l'utilisent. A noter toutefois qu'un volume de sol humecté aussi limité représente un risque potentiel pour le production en cas de panne sur le réseau. Cela explique que dans certaines régions les agriculteurs soucieux d'éliminer tout risque lié à un manque de bonne maîtrise du système combinent le goutte à goutte à l'aspersion ou au gravitaire comme dans les P.O.(Abassi, 1991) par exemple. Le goutte à goutte est mis en service une fois la parcelle copieusement arrosée par gravité, assurant ainsi un niveau d'humidité suffisant durant le cycle cultural. Les risques de percolation durant le cycle cultural sur sols argileux sont ainsi très limités car le maintien d'un niveau d'humidité élevé évite la présence de fentes de retrait et par là même la percolation. La consommation en eau du pêcher selon son degré de précocité varie de 650 à 750 mm selon la Compagnie du Bas Rhône Languedoc (Memo Irrigation BRL). Ses besoins en eau théoriques prévisionnels dans la zone des costières du Gard selon BRL s'échelonnent entre 300 mm pour les variétés les plus précoces à 550 mm pour les plus tardives, l'arrêt des arrosages en cas de pluie n'étant pas toujours la règle adoptée par l'agriculteur. Les doses apportées par les quelques agriculteurs ayant fait l'objet d'un suivi se situent en majorité dans cette fourchette. Pour ceux là on considérera que les risques de pertes par percolation sont négligeables. Ceux susceptibles de dépasser la borne haute pratiquent des compléments d'apports par aspersion ou gravitaire. Les risques de pertes par drainage ne sont pas nuls mais n'ont pu être quantifiés. Des volumes totaux de 850 mm constatés chez un agriculteur des P.O en 1991 laissent supposer qu'un drainage de 250 mm ait pu être atteint.

On se propose à titre d'exemple de montrer les risques de percolation encourus au delà du système racinaire d'un verger de pêchers, ici limité à 75 cm (soit la $\frac{1}{2}$ longueur du domaine 1x1.5 m), lorsque l'on adopte une pratique inadaptée au conditions pédo-climatique. Le sol choisi est un limon sableux ayant une conductivité hydraulique de 3.6 cm/h, caractéristique d'un sol à bonnes potentialités d'infiltration. La demande climatique est de 6.5 mm/j avec une période de pointe située entre 10 et 16 heures. Les figures 13 et 13b montrent à la fois l'impact du débit et du fractionnement sur l'évolution du bulbe sous le goutteur en fin d'arrosage, les figures faisant référence à une même durée d'application.

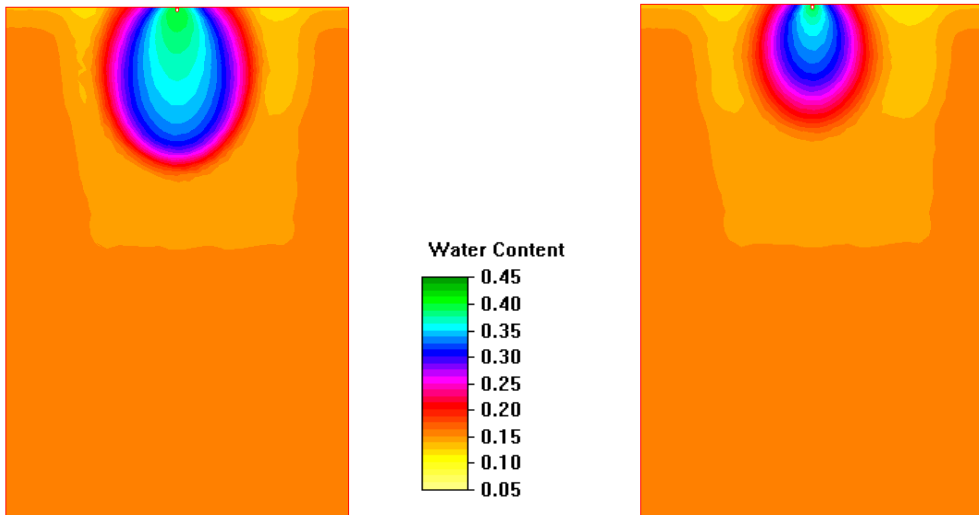


Fig. 13. Fin d'arrosage 1^{er} jour à 4L/h sans fractionnement journalier (SFJ)

Fig.13b Fin d'arrosage1^{er} jour à 2L/h avec fractionnement journalier (AFJ)

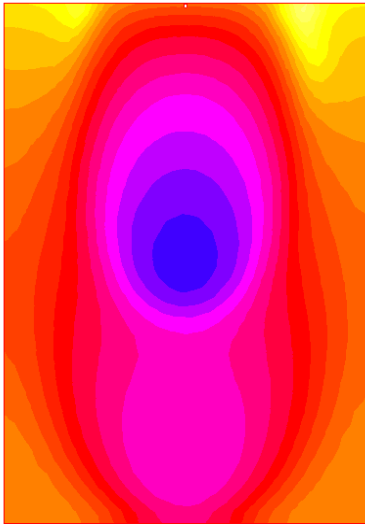


Fig. 14 Fin de cycle de 4 jours
à 4L/h (SFJ), 8h après arrêt



Fig. 14b Fin de cycle de 4 jours
à 2L/h (AFJ), 8h après arrêt

La simulation effectuée sur 4 jours met bien en évidence (Fig. 14) que la pratique consistant à arroser 8 h par jour en continue (8h à 16h) à raison de 4L/h finit par générer des pertes importantes, le caractère cyclique des simulations induisant l'atteinte d'un état stable. En revanche, la pratique consistant en deux apports journaliers de même durée mais à 2L/h et fractionnés avec un intervalle de 4 heures (Fig. 14b) génère de faibles voire des risques nuls de drainage, la teneur en eau volumique n'excédant pas la teneur en eau à la capacité au champ pour ce type de sol ($h_{cc} \cong 0.28\%$). A noter en outre que l'hypothèse d'un goutteur débitant 2L/h pendant 8 h affecté à une surface de 2.5 m² permet de répondre à la demande climatique journalière imposée (de l'ordre de 8 mm/j en période de pointe).

IX Discussion et Conclusion :

En l'absence de tous types de contrainte (ressource, disponibilité du matériel, main d'œuvre), l'agriculteur disposant d'un système lui permettant de décider de l'opportunité d'irriguer pourrait faire en sorte que besoins en eau théoriques et apports réels soient en bon accord. Il en est pas ainsi dans la majorité des cas. Seuls des systèmes d'irrigation en place comme la couverture intégrale, le pivot ou l'irrigation localisée, fonctionnant sans contrainte hydrique, permettent de satisfaire largement aux besoins en eau de la culture. En système contraint du point de vue de la ressource en eau et dans le cas de l'enrouleur, il apparaît que les apports d'eau réalisés par les agriculteurs diffèrent parfois significativement des besoins en eau théoriques. Dans le cas des sols à faible réserve hydrique, on constate une tendance à sous irriguer durant les années sèches et à sur irriguer lors des années humides. Le drainage estimé par simulation est en conséquence souvent élevé sur la période des irrigations mais ce dernier est surtout imputable aux pluies qui sont encore impossibles à prévoir.

Les écarts importants que l'on peut observer entre besoins théoriques et besoins réels sont manifestes sur l'exemple traité dans les sols sableux des Landes avec le pivot. D'une part on est en présence d'un système sans contrainte à la fois sur la ressource et l'usage du matériel et d'autre part il n'est pas question pour l'agriculteur de faire peser le moindre risque sur la production potentielle compte tenu de l'importance de l'investissement. Comme on arrose quasiment en permanence, et compte tenu des risques somme toute élevés de pluie après apport d'eau, le drainage peut s'avérer assez élevé certaines années.

Il serait théoriquement possible de faire en sorte que le drainage soit négligeable sur sols à faibles réserves utiles. Il suffirait pour cela de décider d'irriguer lorsque la réserve facilement utilisable

est épuisée en procédant à des apports faibles et fréquents. Ces apports supposés parfaitement homogènes sur la parcelle devraient être au moins égaux aux besoins maxi de la plante (ETM). L'irrigation localisée permet de réaliser ce type d'apports, mais les agriculteurs ne prennent pas à juste raison (nécessité de maintien du bulbe humide) le risque de maintenir le niveau d'eau du réservoir sol proche de la réserve de survie.

Sur sols profonds à bonne réserve utile ($RU \geq 100$ mm/m), le drainage durant la période d'irrigation peut être considéré négligeable quelque soit le système d'irrigation, à l'exception du gravitaire. Cependant, en conditions d'apports très hétérogènes, le reliquat d'azote qui résulte d'une mauvaise efficacité d'utilisation par la plante, peut être lessivée à la faveur des pluies hivernales.

Concernant le gravitaire, celui-ci est pratiqué à quelques exceptions près sur des sols profonds à bonne réserve utile. De fait les doses apportées quoique importantes ne donnent pas lieu à des pertes par drainages très élevées (de l'ordre de 20 à 25%). Pour les agriculteurs (peu nombreux) disposant de colatures aménagées, 15 à 25 % en moyenne de l'eau délivrée à la parcelle alimente le réseau de fossés pour probablement retourner à la rivière ou être réutilisée pour une parcelle située en aval. L'importance de ces doses induit le fait que la fréquence des irrigations est beaucoup plus faible qu'en aspersion, si l'on ajoute à cela la rareté des pluies en période d'irrigation dans le SE de la France, le drainage sur l'ensemble cycle de culture est donc pour l'essentiel imputable à l'irrigation. On peut pour résumer proposer les critères de performances suivants selon la pratique utilisée par l'agriculteur :

Pratique raies avec colatures : $55 < \text{Efficacité} < 70\%$ ($65 < CU < 80\%$; $15 < Pc < 25\%$)

Pratique raies (ou planche) bouchées : $65 < \text{Efficacité} < 80\%$

L'irrigation localisée bénéficie d'une bonne réputation vis à vis de l'efficacité de l'irrigation. Son usage est très répandu en arboriculture et en maraîchage. Le drainage résultant de l'irrigation est généralement inexistant sous irrigation localisée, les automatismes permettant de parfaire l'adéquation entre apports et besoins journaliers. Cependant dans certains contextes l'irrigation localisée est souvent mal maîtrisée, bien souvent faute de formation ou de conseil prodigués à l'agriculteur. Cela se traduit par des gaspillages d'eau. Les risques de percolation demeurent dans ce cas élevés surtout sur sols à faible réserve utile et sur vergers. La crainte affichée par certains agriculteurs de ne pas maîtriser suffisamment bien cette technique semble se traduire par un abandon progressif du goutte à goutte au profit de la micro aspersion sous frondaison dans le cas des sols à faible réserve utile. D'autres associent le goutte à goutte au gravitaire (cas des sols argileux à fentes de retrait) ou à l'aspersion (sols caillouteux). Ces mesures de substitution, qui en outre allègent significativement les contraintes de filtration, ou de complément (+ aspersion ou gravitaire), contribuent à réduire les risques de percolation et de pollution des nappes résultant de l'irrigation fertilisante.

Au regard des simulations effectuées sur le cas du maïs, on constate que toute région confondues, on obtient un niveau de rendement économiquement assez satisfaisant ($R^t > 100$ qx) sur maïs avec des consommations en eau (ETR) au moins égales à 450 mm.

Le coût de l'eau est le facteur pouvant inciter l'agriculteur à améliorer la performance de l'irrigation. Lorsque le coût de l'eau est faible, l'agriculteur a tendance à optimiser son rendement sans tenir compte de l'usage de l'eau. Selon des évaluations de terrain, Montovani et al., (1995) montrent que pour des coefficients d'uniformité CU proches de 40% des agriculteurs utilisent 2.25 fois la dose requise et seulement 1.25 fois pour un CU proche de 85%. Au contraire lorsque le prix de l'eau est élevé, l'agriculteur sous irrigue pour des systèmes à faible uniformité, acceptant ainsi de plus faibles rendements et irrigue selon les besoins requis seulement lorsque le système d'irrigation lui garantit un CU élevé. Ceci s'explique selon Pereira et al., 2002, par le fait que plus CU est faible et plus forte est la différence entre la dose apportée en zone sur-irriguée et dose apportée en zone sous-irriguée de la parcelle. Cet état de fait justifie que l'on se fixe un objectif d'uniformité lors de projets d'irrigation (Keller et Bliesner, 1990 ; Seginer, 1987) ou qu'on le déduise à partir d'une optimisation de l'assolement (Tarjuelo et al., 1996). Pour résumer, réduire la demande en eau avec de faibles impacts sur le rendement, nécessite d'abord que le système puisse générer un CU élevé et, ensuite, qu'une

méthode de pilotage de l'irrigation adaptée au contexte soit adoptée. Mais en raison des contraintes pesant sur l'exploitation, on sait hélas que cette méthode de pilotage est difficile à appliquer car peu adaptée à la gestion de l'irrigation sur l'ensemble de la sole irriguée.

La présente étude a souligné la difficulté qu'il y avait à estimer le terme "restitution" (au milieu physique) du bilan hydrique en raison des nombreux facteurs tels que le sol, le climat de l'année, la culture, le système d'irrigation et la pratique de l'agriculteur. Une évaluation des principaux termes du bilan pourrait être proposée à l'issue de la campagne d'irrigation et ce, relativement à un contexte représentatif (sol-système de culture) d'une région donnée. Cette évaluation de référence, obtenue au moyen d'outils tels que ceux utilisés dans le cadre de cette étude, viendrait en soutien des instruments visant à améliorer la gestion des ressources en eaux. La faisabilité de l'opération réside cependant en la difficulté de disposer de données climatiques (ETP et pluies) relatives à la campagne d'irrigation écoulée dans un délai raisonnable.

Références :

- Abassi B., 1991 Etude des pratiques de l'irrigation localisée sur pêchers en Languedoc Roussillon. Intérêt des irrigations de complémentaires réalisées par les producteurs. Mem. Ing. ENSH mention Horticulture , 68p + annexes.
- ARTEMIS, 1989 Aquisition des références technico-économique sur les matériels d'irrigation de surface(DDA, bouches du Rhône, Cemagref, SCP, ARDEPI)
- Blaine R. Hanson 1987. A system approach to drainage reduction (Californian Agrculture , Sept. 1987, 19-24p.
- BRL Compagnie Nationale d'Aménagement de la Région Bas –Rhône Languedoc, 1985, Memo irrigation, 49p.
- Burt, C.M., A.J. Clemerns, 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.
- Cabelguenne, M., Marty, J.R., Hilaire A., 1982. Comparaison technico-économique de la valorisation de l'irrigation par quatre culture 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
- DeBoer, 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.
- Dubalen, J., 1993. Utilisation des matériels d'irrigation par aspersion . Diagnostic de fonctionnement au champ . La Houille Blanche 2/3, 183-188.
- FAO, 1975. Les besoins en eau des cultures Bulletin d'irrigation et de drainage, bul. No 24, ISBN 92-5-200136-D., 197p.
- Fusillier, J.L., Saque, C., 2001. Stratégies de production agricole et demande en eau d'irrigation – Une approche de la diversité des irrigants sur les périmètres hydro-agricoles du sud de l'île de la Réunion. Séminaire préservation et valorisation de l'eau dans le domaine littoral.
- Gonzalez J..M. Camacho., 2002. Impacts attendus du changement climatique sur l'agriculture irriguée dans la basse vallée de la Drôme. Rapport d'étude 70 p.
- 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.
- IRRIMIEUX 2002 Etude d'actions de conseil et d'appui technique pour une irrigation économe en

- eau. Rapport d'étude 40 p.
- Keller, J., Bliesmer, R.D., 1990. Sprinkler and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, 652 pp.
- Kohl, K.D., Kohol, R.A., Deboer D.W. 1967. Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss, Transaction of ASAE, 1967, Vol.30(4), p. 1071-1074.
- Labbé, F., P. Ruelle, P. Leroy, J.C. Mailhol, (col) (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.
- Labbé, F., P. Ruelle, Garin, P., Leroy, P. 2000. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortage., European Journ. of Agronomy. (12) 55-67.
- Louie, M.J., Seller, J.S., 2000. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. J. Irrig Drain. Eng. 126 (3), 142-148.
- Mailhol J.C.(1992). Un modèle pour améliorer la conduite de l'irrigation à la raie. ICID Bulletin, vol. 41, N° 1, 43-60 p.
- Mailhol J.C.,(1992). Méthodes de conduite de l'irrigation à la raie pour améliorer son efficience - 16th European regional conference of ICID . BUDAPEST juin 1992 p174-183 .
- 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. I. Picheral (1994). Regional water requirements and crop yied according to water avelability , 17th European regional conference on irrigation and drainage. ICID Varna May 1994. 73-82p.
- Mailhol, J.,C., P. Ruelle, P. Revol (1996). PILOTE : Un modèle opérationnel pour déceler l'apparition du stress hydrique. ICID Le Caire Sept. 1996.
- Mailhol, J.,C., M. Baqri, M. Lachhab (1997). Operative modelling for closed -end furrows. Irrig. and Drain. Syst., 11: 347-366p.
- 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,35(1997) 167-182.
- Mailhol J.C., Priol M., Benali M. 1999. A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. Agric. Water Management. 1475 (1999) 1-17
- Mailhol, J.C., P., Ruelle 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. 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)
- Molle, B., 1998. Programme régional d'appuis technique aux irrigants d'Aquitaine Compte rendu des actions 92-97. Pivots et rampes frontales. Rapport d'étude.100p.
- Montovani, E.C., Villalobos, F.J., Orguaz, F., Ferreres, E., 1995. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. Agric Water Manage. (27) 243-257.
- 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.
- Pereira L.S., Oweis, Th., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. Agric. Water Manage., (57) 175-206.
- Picheral, I., 1993. Validation de l'approche "BILANREG" pour évaluer lla 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.
- Platon, J.P., Mailhol, J.C., 1998. Mise à jours des références technico-économique sur l'utilisation des matériels d'irrigation de surface. Rapport d'étude 80p.
- Revol, Ph., Belluau E., Kosuth, P., Ledore F., 1995. Irrigation des vergers : Le goutte à goutte en question ?L'arboriculture fruitière N° 481 22 Mars 1995. 4p.

- 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.
- Seginer, I., 1987. Spatial water distribution in sprinkler irrigation. In Hillel, D., (Ed) . *Advances in irrigation.*, Vol 4. Academic Press, Orlando, pp.. 119-168.
- Steiner, J.L., Kamernasu, E.T., Clark, R.N. 1983. Spray losses and partitionng of water under a center pivot sprinkler system. *Trans. Of ASAE*, 26(4), 1128-1134.
- 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 albacette Spain *Agric. Wter Manage.*, 31, 145-163.
- 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.
- Trout 1990, T., J., 1990. Furrow inflow and infiltration variability impact on irrigation management. *Transaction of ASE*, 33(4) : 1171-1178.
- Yazar, A., 1980 Determination of evaporation and drift losses from sprinkler irrigation systems under various operating and climatic conditions, Thèse d'université of Lincoln, Nebraska.