



Impact du pilotage et du choix de la technique d'irrigation sur l'économie de l'eau en climat méditerranéen.

Impact of driving and the choice of technical irrigation in the water economy on mediterranean climate.

Ali SI SMAIL ⁽¹⁾, Malek ABDESSELAM ⁽²⁾ & Chabane AIGOUN ⁽³⁾

Abstract: Irrigation is essential for food resources. It is crucial to compensate insufficient rainfall that characterizes particularly the arid and semi-arid region (case of south mediterranean sea). Sustainable agriculture requires adequate control irrigation, providing water and doses of inputs at appropriate times, depending on weather conditions, plant requirements and soil characteristics. In this study the focus is on the impact of the choice of irrigation method on water saving. It is applied to two different cultures: seasonal potatoes and a citrus orchard, at two parcels in the Sebaou Valley (Algeria). Irrigation management is according to water balance method using two types of watering schedules: fixed dose and variable dose. Thus it was found that compared to gravity by furrow and sprinkler by mobile ramps, micro irrigation with dripper is very advantageous in terms of debit of operation and daily and overall water volume.

Keywords: water deficit, irrigation, climatic factors, yield, Sebaou.

Résumé : L'irrigation est indispensable pour les ressources alimentaires. Elle est cruciale pour palier à l'insuffisance des précipitations qui caractérise particulièrement les régions arides et semi-arides (cas du sud de la Méditerranée). Une agriculture durable exige un pilotage adéquat des arrosages, en apportant les doses d'eau et d'intrants, à des moments opportuns, en fonction des conditions climatiques, des besoins de la plante et des caractéristiques du sol. Dans cette étude, l'intérêt est porté sur l'impact du choix du mode d'irrigation sur l'économie de l'eau. Elle est appliquée à deux cultures différentes : pomme de terre de saison et un verger d'agrumes, au niveau de deux parcelles situées dans la vallée du Sébaou (Algérie). La gestion de l'irrigation est selon la méthode du bilan hydrique et selon deux types de calendriers d'arrosages : à dose fixe et à dose variable. Ainsi on a constaté que comparativement au gravitaire par sillon et à l'aspersion par rampes mobiles, la micro-irrigation avec goutteur est très avantageuse en termes de débit de fonctionnement et de volume d'eau journalier et global.

Mots-clés : déficit hydrique, irrigation, facteurs climatiques, rendement, Sébaou

INTRODUCTION

La répartition des prélèvements d'eau douce à l'échelle mondiale, selon la FAO, est de 10% pour les ménages, 20% pour l'industrie et 70% pour l'agriculture (irrigation avec fourrage et pâturage pour l'élevage, l'élevage avec abreuvement et nettoyage et l'aquaculture). Ces prélèvements, dans le cas de l'agriculture, varient selon le climat et la place de cette dernière dans l'économie : 2/3 des pays dédiant moins de 10% de leurs prélèvements à l'agriculture sont des pays industriels, avec un climat modéré, en Europe (AQUASTAT, 2014).

La distribution de l'eau, juste en arrosage des terres agricoles, diffère d'un pays à l'autre. Au niveau mondial : le gravitaire couvre de 85 à 87% des surfaces irriguées, l'aspersion environ 10 à 12% et l'irrigation localisée les 1 à 2% restants. Le gravitaire domine essentiellement dans les pays en développement où l'énergie est chère, rare et surtout mal distribuée.

Adresse (1), (2) et (3) : Fac., Agro-Bio, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou (15000), Algérie
asismail03@yahoo.fr, malekabdesselam@yahoo.fr, chabane_aigoun@hotmail.fr.

Souvent les ressources en eau n'y sont pas critiques, et la main d'œuvre non spécialisée est abondante. Ce qui n'est pas le cas de la France par exemple où l'irrigation par aspersion représente environ 82% du total des surfaces irriguées, l'irrigation gravitaire 14% et l'irrigation localisée 3% (DUNGLAS, 2014).

Des études expérimentales réalisées en Israël ont montré que comparativement à l'aspersion et à la raie, le goutte à goutte permet d'augmenter les rendements agricoles de 30% avec les mêmes volumes d'eau d'irrigation (FAO, 1973 ; ZELLA & SMADHI, 2007).

La limitation, quantitative, de la ressource en eau dans les régions méditerranéennes et arides vont entraîner, obligatoirement, des modifications dans les méthodes d'irrigation (micro-irrigation). Les zones irriguées et l'aval de celles-ci vont être de plus en plus concernées par des problèmes environnementaux relatifs à la qualité chimique et biologique de l'eau. Il est essentiel d'instaurer un nouveau type d'irrigation durable, qui semble particulièrement indispensable à la sécurité alimentaire et environnementale des zones sud de la Méditerranée (CHEVERRY & ROBERT, 1998).

La caractérisation des fluctuations hydrologiques et la détermination des états sec et humide des bassins versants du sud de la Méditerranée, montrent bien la forte corrélation entre les précipitations et les débits d'écoulement superficiels, que les séquences sèches sont plus persistantes et plus étendues que les séquences humides et que la sécheresse est un phénomène récurrent (ELBOUQDAOUI *et al.*, 2006 ; DECHEMI & CHAMBAZ, 1994).

Le développement de l'agriculture en utilisant des techniques de gestion efficace et d'économie d'eau, ainsi que l'amélioration de l'accès à cette ressource grâce à des points d'eau est une priorité vitale. C'est le cas notamment de certaines populations tribales d'Afrique, contraintes parfois à des déplacements à cause de la variabilité des ressources en eau due au changement climatique (LADEL, 2013 ; GEMENNE *et al.*, 2017).

L'objectif de la présente étude consiste justement à étudier, d'un point de vue quantitatif, l'influence du mode d'irrigation, sur la ressource hydrique. Pour cela, on a opté pour deux cultures différentes en terme de besoins en eau, les plus irriguées dans la vallée du Sébaou: l'une est maraîchère (pommes de terre de saison) et l'autre est pérenne (un verger d'agrumes).

La vallée du Sébaou représente la région la plus agricole de la wilaya de Tizi Ouzou (région méditerranéenne située au nord de l'Algérie). Elle est caractérisée par de bonnes aptitudes agro-pédologiques. Un projet de vulgarisation relatif à la reproduction des semences de pomme de terre, bien encadré, dans lequel les exigences techniques ont été bien respectées (sélection de semences, gestion de l'irrigation et des intrants) a mis en évidence le grand potentiel de la vallée, avec une croissance des rendements spectaculaire, qui sont passés de 200 q/ha à 400 q/ha (BOUAÏTTA, 1993).

L'analyse de la qualité de l'eau de certains forages, en période de basses eaux, proches des parcelles où l'usage des engrais azotés est très fréquent, a révélé une teneur en nitrate très élevée : 110 mg/l (ANRH, 2004).

Cette pollution anthropique, générée par l'irrigation non modernisée, avec des apports d'eau et d'intrants approximatifs (sans outils de pilotage), non seulement n'a pas amélioré les rendements mais elle a généré une pollution considérable (teneur en nitrate >> 50 mg/l : norme admissible selon l'OMS).

LA REGION D'ETUDE

Les parcelles étudiées sont situées dans la vallée du Sébaou qui représente la région la plus importante en termes d'activité agricole, industrielle, de densité de population et de réserves en eau, de la wilaya de Tizi Ouzou (région méditerranéenne au nord de l'Algérie, à 93 km à l'est d'Alger).

Actuellement, sur une surface de 7050 ha facilement irrigable dans cette vallée, seulement 2600 ha sont arrosés (≈37%): 13% avec le gravitaire, 85% par aspersion (souvent par rampes mobiles) et seulement 2% avec le goutte à goutte.

Environ 45% des surfaces irriguées sont localisées dans la vallée du Sébaou. Les cultures arrosées sont essentiellement: l'arboriculture, les cultures maraîchères et fourragères.

Les rendements agricoles sont de l'ordre de 250 q/ha pour les pommes de terre et de 230 q/ha pour les agrumes (Direction des Services Agricoles de la Wilaya de Tizi Ouzou: DSA, 2010).

Le climat de la région est méditerranéen tempéré, caractérisé par un hiver pluvieux et frais et un été sec et chaud. La période sèche s'étale généralement de la fin du mois de mai jusqu'au début du

mois d'octobre, comme le montre le digramme ombrothermique (Fig. 1). La pluviométrie est variable selon l'altitude. Elle est de l'ordre de 1100 mm dans la chaîne montagneuse du Djurdjura et de 700 mm dans la vallée à Tizi-Ouzou. Cette pluviométrie est très irrégulière et mal répartie. Entre les mois de mai et septembre, on n'enregistre que 15% de la pluie annuelle. Le recours à l'irrigation utilisant les eaux de surface et souterraines est donc indispensable pendant cette période (Office National de Météorologie d'Algérie: ONM, 1985-2010).

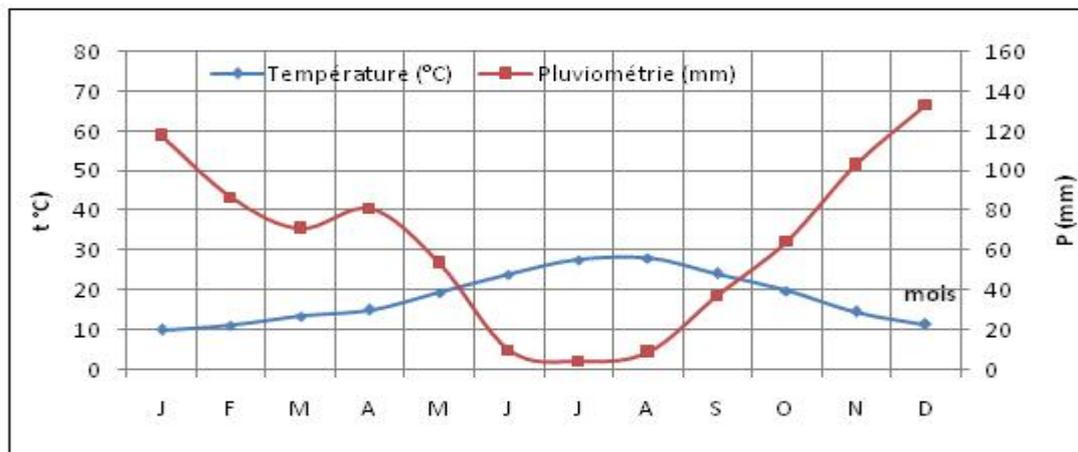


Figure 1 : Diagramme ombrothermique de la région de Tizi Ouzou (ONM: 1985 -2010).

MATERIELS ET METHODES

Les techniques d'irrigation

L'irrigation en goutte à goutte ou la micro-irrigation est une irrigation localisée qui consiste à l'humidification optimale de la zone du sol directement formée et influencée par les racines (la rhizosphère). Ce qui présente une économie d'eau considérable lors des arrosages.

Elle fonctionne avec de faibles pressions et de faibles débits ($P \approx 1 \text{ bar}$, $2 \text{ l/h} \leq Q \leq 12 \text{ l/h}$), elle ne mouille pas le feuillage, elle offre la possibilité de fertilisation et d'automatisation.

Elle nécessite peu de main d'œuvre (contrôle et entretien) et son rendement est très élevé ($R_h \geq 95 \%$). Cependant elle ne convient pas pour les grandes cultures (blé, maïs, colza, ...) où l'avantage revient à l'aspersion par systèmes pivots et avec canons d'arrosage.

Ces équipements sont relativement coûteux et elle exige une eau de qualité, pour éviter le bouchage des goutteurs (filtration) et une étude de projet très précise pour pouvoir atteindre des rendements élevés et une longue durée de fonctionnement du réseau, qui permettront un amortissement rapide des investissements (VERMEIREN, 1983).

Le gravitaire par sillons s'effectue par l'infiltration d'une partie des ruissellements en surface, les pertes en colature sont inévitables. Il nécessite d'adapter le débit selon la longueur du sillon, sa pente et la perméabilité du sol. Il ne doit pas dépasser le seuil de $Q_{\max} = 3 \text{ l/s}$. La pente doit être $\leq 0,5\%$ pour éviter l'érosion et le lessivage et $\geq 0,05\%$ pour favoriser le drainage. Elle nécessite de la main d'œuvre. L'intervalle de son rendement hydraulique est $[55 \% \leq R_h \leq 75 \%]$.

L'irrigation par aspersion, consiste à produire une pluie artificielle en forçant un volume d'eau à travers la buse de faible diamètre d'un asperseur. Ce dernier est caractérisé par son débit, sa pression, sa pluviométrie et la portée de son jet. L'écoulement s'effectue sous pression (usage de pompes). Elle est très sensible à l'action du vent et elle nécessite de la main d'œuvre pour le déplacement des rampes et des asperseurs. Le rendement hydraulique se situe dans l'intervalle $[70 \% \leq R_h \leq 90 \%]$.

Toutes ces techniques sont présentées de manière détaillée par VERMEIREN (1983), BROUWER *et al.* (1990), RIEUL (2003) et SOUTTER *et al.* (2007).

La réserve utile (RU) et la réserve facilement utilisable (RFU)

Elle représente la quantité d'eau qu'un sol peut mettre à la disposition des racines du végétal. Elle dépend de la texture, de la structure, de la profondeur racinaire et de la teneur en matière

organique. Elle est déterminée à partir des seuils d'humidité dans le sol de référence (teneurs en eau), représentés par la capacité de rétention maximale dite aussi la capacité au champ et du point de flétrissement temporaire (SOUTTER *et al.* 2007)

Le taux d'humidité d'un sol ou sa teneur en eau s'exprime par la relation

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

où V_w est le volume de l'eau dans l'échantillon et V_T est le volume total de l'échantillon

L'état hydrique du sol est représenté par la notion de pF :

$$pF = \log \psi = \log |h|$$

où : h est la charge ou le potentiel de pression matricielle en cm ($h < 0$) et Ψ est la succion matricielle : ($\Psi = -h$)

Les taux d'humidités remarquables sont:

- la capacité de rétention maximale (θ_{max}) : $pF = \log (330) = 2,5$
- le point de flétrissement temporaire (θ_{ft}) : $pF = \log (10000) = 4$
- le point de flétrissement permanent (θ_{fp}) : $pF = \log (16000) = 4,2$

Ainsi, on définit :

$$\text{la réserve utile : } RU = (\theta_{max} - \theta_{fp}) \cdot z \quad (mm)$$

$$\text{et la réserve facilement utilisable : } RFU = (\theta_{max} - \theta_{ft}) \cdot z \quad (mm)$$

où : θ_{max} , θ_{ft} et θ_{fp} sont des teneurs en eau volumétriques (mm/m) et z est la profondeur racinaire (m).

La dose nette (D_n)

On peut alors déterminer la dose nette D_n à partir des relations suivantes, dans le cas du gravitaire et par aspersion on peut reconstituer 2/3 ou 1/2 de la RFU (selon les cas) :

$$D_n = 2/3 \cdot RFU = 2/3 \cdot (\theta_{max} - \theta_{ft}) \cdot z \quad (mm)$$

$$D_n = 1/2 \cdot RFU = 1/2 \cdot (\theta_{max} - \theta_{ft}) \cdot z \quad (mm)$$

Dans le cas du goutte à goutte, on tient compte également de la sensibilité à la sécheresse de la culture :

$$D_n = (\theta_{max} - \theta_{ft}) \cdot z \cdot e \cdot P/100 \quad (mm)$$

où : e est le degré d'extraction de l'eau ($0,3 \leq e \leq 0,6$; avec $e = 0,3$ dans le cas des cultures sensibles à la sécheresse) et P est le pourcentage de sol humidifié, déterminé sur le tableau de Karmeli (VERMEIREN, 1983): $P = 34$ dans le cas d'un verger espacé (6m x 6m) et $P = 50$ dans le cas des pommes de terre, avec une rampe pour deux lignes de cultures espacées de 0,75 m (cas de cette étude)

La dose brute (D_b)

La dose brute est la dose pratique, réellement apportée, lors des irrigations, Elle dépend de l'efficacité de la technique d'arrosage à minimiser les pertes en eau (de son rendement hydraulique : R_h). Elle est donnée par la relation :

$$D_b = D_n / R_h$$

Le débit d'irrigation

Dans cette étude on a considéré un rendement hydraulique proche de l'optimal, pour chacune des techniques d'irrigation adoptée : $R_h = 65\%$ pour le gravitaire, $R_h = 85\%$ pour l'aspersion et $R_h = 95\%$ pour le goutte à goutte.

Ceci permet de déterminer le débit horaire Q_h indispensable au dimensionnement et au choix des équipements d'arrosage:

$$Q_h = 10^{-3} \cdot D_b \cdot S/t \quad (m^3/h)$$

où : Q_h (m^3/h) est le débit horaire, D_b (mm) est la dose brute, S (m^2) est la surface du poste d'arrosage ou de l'unité d'arrosage et t (h) est la durée d'arrosage.

La courbe de rétention en eau (modèle de VAN GENUCHTEN, 1980)

Afin d'établir les courbes de rétention en eau $\theta(h)$, on a opté dans cette étude, pour le modèle le plus répandu qui est celui de VAN GENUCHTEN (1980), donné par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad h < 0 \\ \theta(h) = \theta_s \quad h \geq 0 \end{array} \right.$$

où : θ_s est la teneur en eau à saturation (cm^3/cm^3), θ_r est la teneur en eau résiduelle (cm^3/cm^3), α est un paramètre de forme lié à la taille moyenne des pores (cm^{-1}), n est un paramètre lié à la distribution des tailles de pores (-) et m est un paramètre qui dépend de n : $m = 1 - 1/n$.

L'estimation de ces paramètres est établie au moyen du code *Rosetta* : Programme numérique pour l'estimation des paramètres hydrauliques des sols avec les fonctions de pédotransferts hiérarchiques (SCHAAP, 2002).

L'avantage réside dans l'utilisation des données propres aux sols de la région d'étude, relatives à leurs densités apparentes (D_a) et à leurs textures (% d'argile, % de limon et % de sable).

Besoins en eau des cultures

Ils traduisent l'évapotranspiration maximale (ETM). Elles sont en fonction de la culture à irriguer, de son stade de développement (coefficient cultural : K_c) et des conditions climatiques de la région, représentées par l'évapotranspiration potentielle (ETP) de la période considérée :

$$ETM = K_c \cdot ETP \quad (mm)$$

Dans le cas du goutte à goutte, on prend également en considération le taux de couverture du sol par les plantes représenté par le coefficient K_r (VERMEIREN, 1983) :

$$ETM = K_r \cdot K_c \cdot ETP \quad (mm)$$

$K_r \approx 0,80$ pour un taux de couverture de 60 à 70%.

On peut déduire alors les besoins journaliers en eau (Evapotranspiration maximale journalière : $ETMJ$) dans le cas où l' ETM est mensuel :

$$ETMJ = ETM/NJ \quad (mm)$$

où NJ est le nombre de jours du mois considéré.

Fréquence des arrosages

On peut également déduire la fréquence (F_r) de renouvellement des arrosages (durée en jours entre deux arrosages successifs sur un même poste) :

$$F_r = D_n/ETMJ \quad (jour)$$

La fréquence minimale correspond donc au mois de pointe, d' $ETMJ$ maximal :

$$F_r(\min) = D_n/ETMJ(\max) \quad (jour)$$

La pluie efficace

D'un point de vue agronomique, la pluie efficace (P_{eff}) ou la pluie utile, représente la quantité d'eau pluviale retenue dans la zone racinaire qui peut être utilisée par la plante. C'est la pluie totale moins le ruissellement, moins l'évaporation et moins la percolation en profondeur (VAN LAERE, 2003 ; BROUWER *et al.*, 1987). Elle peut être estimée à partir de la formule du Département Américain de l'Agriculture (USDA) :

$$P_{eff} = P_{moy} \cdot (1 - 0,2 \cdot P_{moy}/125) \quad ; P_{moy} < 250 \text{ mm/mois}$$

$$P_{eff} = 125 + 0,1 \cdot P_{moy} \quad ; P_{moy} > 250 \text{ mm/mois}$$

Pilotage de l'irrigation

L'objectif du pilotage de l'irrigation est de gérer les arrosages d'une manière rationnelle en apportant les doses d'eau nécessaires aux cultures à des moments opportuns. Il existe essentiellement quatre outils de pilotage possibles : mesure de l'état hydrique du sol (tensiomètres, *Time Domain Reflectometer* ou TDR, sonde à neutron, etc.), mesure de l'état hydrique de la plante (Potentiel foliaire, pistolet à infrarouge, mesure de flux de sève), établissement du bilan hydrique et les avertissements (informations diffusées à travers les médias). Ces différents outils sont présentés d'une manière détaillée dans le guide pratique d'irrigation (RIEUL, 2003).

Dans la présente étude, on a opté pour la méthode du bilan hydrique (Fig. 2) établie à partir des données climatiques, des caractéristiques des sols de la région d'étude et des exigences des cultures à irriguer.

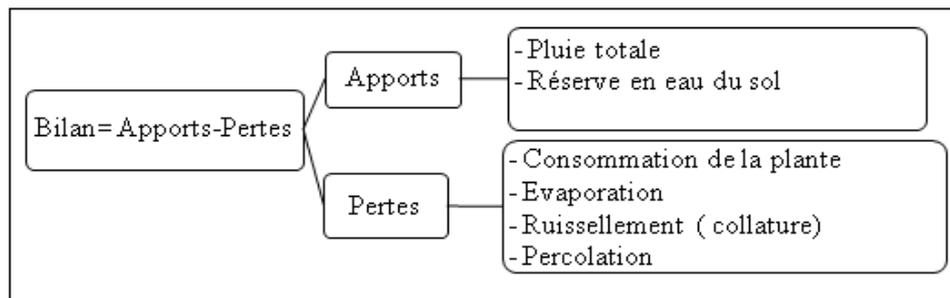


Figure 2 : Les éléments essentiels d'un bilan hydrique en irrigation

D'une manière générale, on parle de déficit hydrique dès que le bilan est négatif (apports < pertes). Cependant, dans la pratique, il n'est pas raisonnable d'atteindre le dessèchement total du sol pour irriguer (risque de chute quantitative et qualitative des récoltes agricoles).

A cet effet, il existe trois approches différentes qui consistent à maintenir l'humidité du sol : soit au voisinage du point de flétrissement temporaire (θ_f), soit au voisinage de la capacité de rétention maximale (θ_{max}) ou bien à un pourcentage donné de la réserve facilement utilisable (RFU). C'est cette approche intermédiaire, souvent recommandée, qu'on a utilisé dans le cadre de cette étude, au moyen de calendriers d'arrosages à dose fixe et à dose variable (DUCROCQ, 1990).

Calendrier d'arrosage à dose fixe et à fréquence variable

Il présente l'avantage de ne pas modifier l'hydraulique du réseau (débit x durée d'arrosage constant) :

$$D_b = D_n/R_n = \text{constante}$$

C'est uniquement la fréquence des arrosages qui change d'une période (i) à l'autre, selon le changement des besoins de la culture à irriguer $ETMJ_{(i)}$ et la réserve eau $R_{(i)}$ du sol.

$$Fr_{(i)} = R_{(i)} / ETMJ_{(i)}$$

A cet effet, il convient mieux pour le gravitaire et les systèmes non automatisés.

Calendrier d'arrosage à fréquence fixe et à dose variable

Dans ce cas, la fréquence des arrosages est fixe. Elle correspond à la fréquence minimale établie pour le mois de pointe :

$$F_r(\min) = D_n/ETMJ(\max) = \text{constante}$$

Par contre, la dose est quant à elle variable selon la période :

$$Dose = R_i - (Fr_{(\min)} \cdot ETMJ_{(i)})$$

où R_i est la réserve initiale en eau du sol au début de la période considérée. Elle est égale à celle de la fin de la période précédente et $ETMJ_{(i)}$ est le besoin en eau journalier de la période considérée.

Dans la région d'étude, le mois de pointe correspond au mois de juillet (besoin en eau maximum). La réserve initiale R_i et celle du début du mois de mai pour les agrumes et du début du mois d'avril pour la pomme de terre.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont relatifs : aux réserves en eau facilement utilisables RFU des deux parcelles étudiées, établies à partir de la courbe de rétention en eau $\theta(h)$ (selon le modèle de VAN GENUCHTEN) et aux doses, fréquences, calendriers d'arrosage, débits horaires, et volumes d'eau nécessaires déterminés selon la méthode du bilan hydrique, basée sur les données du sol, du climat de la région et des caractéristiques des cultures étudiées : verger d'agrumes adulte et pomme de terre de saison.

Ce qui a permis de déterminer également les éléments nécessaires pour la mise en œuvre de chacune des techniques d'irrigation selon leurs exigences respectives (débit, pression des goutteurs et d'asperseurs, leur nombre, leurs emplacements, répartition des rampes et des sillons et leurs débits). Tous ces résultats sont présentés sous forme de tableaux, afin de mieux effectuer une étude comparative entre les différentes techniques analysées.

Calcul des réserves utiles

Elles sont déterminées à partir des caractéristiques des sols des parcelles étudiées au moyen du logiciel *Rosetta* (SCHAAP, 2002). Elles sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1. Estimation des paramètres du modèle de VAN GENUCHTEN à partir des caractéristiques des deux sols étudiés au moyen du programme *Rosetta*.

Caractéristiques du sol	Données				Texture
	Da (g/cm ³)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	
Parcelle d'agrumes	1,44	31,78	56,33	11,59	Limoneux argileux argileux
Parcelle de pommes de terre	1,32	43,5	35,4	21,10	
Paramètres du modèle	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	A (cm ⁻¹)	n (-)	m(-)
Parcelle d'agrumes	0,085	0,439	0,008	1,515	0,340
Parcelle de pommes de terre	0,096	0,484	0,014	1,381	0,276
Equation de la courbe de rétention					
Sol limoneux argileux (agrumes)	$\theta(h) = 0,085 + 0,355(1 + 0,008 h ^{1,515})^{-0,340}$				
Sol argileux (pommes de terre)	$\theta(h) = 0,096 + 0,390(1 + 0,014 h ^{1,381})^{-0,276}$				
Estimation de la RFU					
Sol limoneux argileux (agrumes)	$\theta_{max} = \theta(-330)$ 0,286 (cm ³ /cm ³)		$\theta_{fr} = \theta(-10000)$ 0,122 (cm ³ /cm ³)	RFU = $\theta_{max} - \theta_{fr}$ 164 (mm/m)	
Sol argileux (pommes de terre)	0,306 (cm ³ /cm ³)		0,155 (cm ³ /cm ³)	151 (mm/m)	

Le bilan hydrique et l'établissement des calendriers d'arrosage

Les résultats sont regroupés pour chaque technique et chacune des cultures dans les tableaux 2 et 3 ainsi qu'aux figures 3 à 6

Calendriers d'arrosage à dose fixe

Tableau 2. Bilan hydrique pour un calendrier d'arrosage à dose fixe des agrumes.

Période sèche	Données				
	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre
Pluie (mm)	64,2	9,9	3,6	6,7	39,0
Pluie efficace : Peff (mm)	57,61	9,74	3,58	6,63	36,57
Evapotranspiration : ETP (mm)	101,96	162,85	220,25	214,12	132,24
Coefficient cultural : Kc	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Coefficient de couverture : Kr	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Irrigation gravitaire et par aspersion					
Besoin mensuel en eau : ETM (mm)	86,67	138,42	187,21	182,00	112,40
Bilan hydrique : ETM- Peff (mm)	29,06	128,68	183,63	175,37	75,84
Nombre de jours du mois	31	30	31	31	30
Besoin journalier en eau : ETMJ (mm)	0,94	4,29	5,92	5,66	2,53
Dose nette : Dn (mm)	82,00	82,00	82,00	82,00	82,00
Fréquence d'arrosage : fr (jour)	87	19	14	14	32
Dose brute (Gravitaire) : Db (mm)	126,15	126,15	126,15	126,15	126,15
Dose brute (Aspersion) : Db (mm)	96,5	96,5	96,5	96,5	96,5
Irrigation en goutte à goutte					
Besoin mensuel en eau :ETM (mm)	69,33	110,74	149,77	145,60	89,92
Bilan hydrique : ETM- Peff (mm)	11,73	100,99	146,19	138,97	53,36
Nombre de jours du mois	31	30	31	31	30
Besoin journalier en eau : ETMJ (mm)	0,38	3,37	4,72	4,48	1,78
Dose nette : Dn (mm)	12,55	12,55	12,55	12,55	12,55
Fréquence d'arrosage : fr (jour)	33	4	3	3	7
Dose brute Db : (mm)	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2

Tableau 3. Bilan hydrique pour un calendrier d'arrosage à dose fixe de la pomme de terre.

Etapes de croissance	Données						
	stade initial	développement		mi-saison		fin de saison	
Période	1 avril-30 avril	01 mai-31 mai	1 juin-4juin	5 juin-30 juin	1 juil-14 juil	15 juil-31 juil	1 aout-8 aout
Pluie (mm)	81,4	64,2	9,9	9,9	3,6	3,6	6,7
Pluie efficace : Peff (mm)	70,80	57,61	9,74	9,74	3,58	3,58	6,63
Evapotranspiration : ETP (mm)	55,67	101,96	162,85	162,85	220,25	220,25	214,12
Coefficient cultural : Kc	0,45	0,75	0,75	1,1	1,1	0,9	0,9
Coefficient de couverture : Kr	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Irrigation gravitaire et par aspersion							
Besoin mensuel en eau : ETM (mm)	25,05	76,47	122,14	179,14	242,28	198,23	192,71
Bilan hydrique : ETM- Peff (mm)	-45,75	18,86	112,39	169,39	238,70	194,65	186,08
Nombre de jours du mois	30	31	30	30	31	31	31
Besoin journalier en eau : ETMJ (mm)	-1,52	0,61	3,75	5,65	7,70	6,28	6,00
Nombre de jours de la période	30	31	4	26	14	17	8
Dose nette : Dn (mm)	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5	50,5
Fréquence des arrosages : fr (jour)		82	13	9	6	8	8
Dose brute (Gravitaire) : Db (mm)		77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7
Dose brute (Aspersion) : Db (mm)		59,4	59,4	59,4	59,4	59,4	59,4
Irrigation en goutte à goutte							
Besoin mensuel en eau : ETM (mm)	21,29	65,00	103,82	152,26	205,93	168,49	163,80
Bilan hydrique : ETM- Peff (mm)	-49,50	7,39	94,07	142,52	202,35	164,91	157,17
Nombre de jours du mois	30	31	30	30	31	31	31
Besoin journalier en eau : ETMJ (mm)	-1,65	0,24	3,14	4,75	6,53	5,32	5,07
Nombre de jours de la période	30	31	4	26	14	17	8
Dose nette : Dn (mm)	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5	11,5
Fréquence des arrosages : fr (jour)		48	4	2	2	2	2
Dose brute : Db (mm)	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

Calendrier d'arrosage à dose variable

Le principe de l'établissement du calendrier d'arrosage à dose variable est analogue à celui à dose fixe, sauf que dans ce cas, on renouvelle l'arrosage selon une fréquence fixe qui correspond à la fréquence minimale relative au mois de pointe, qui correspond au mois de juillet (selon la technique d'arrosage):

$$F_r(\min) = D_n / \text{besoin journalier}(\max) = \text{constante}$$

Par contre, la dose est variable selon la période: $Dose = R_i - (Fr_{(\min)} \cdot ETMJ_{(i)})$
 où : R_i est la réserve initiale en eau du sol : celle du début du mois d'avril (≈ 45 mm et 49 mm) pour la pomme de terre et celle du début du mois de mai (≈ 23 mm et 32 mm) pour les agrumes.

Les résultats sont donnés ci-dessous sous forme d'histogrammes : $dose = f(\text{date})$ représentés sur les figures 3 à 6.

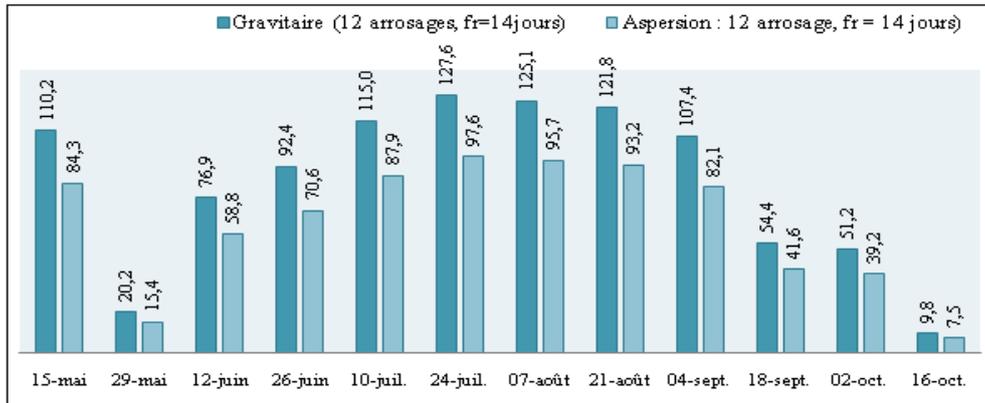


Figure 3: Calendrier d'arrosage à dose variable (mm) par aspersion et par sillon des agrumes.

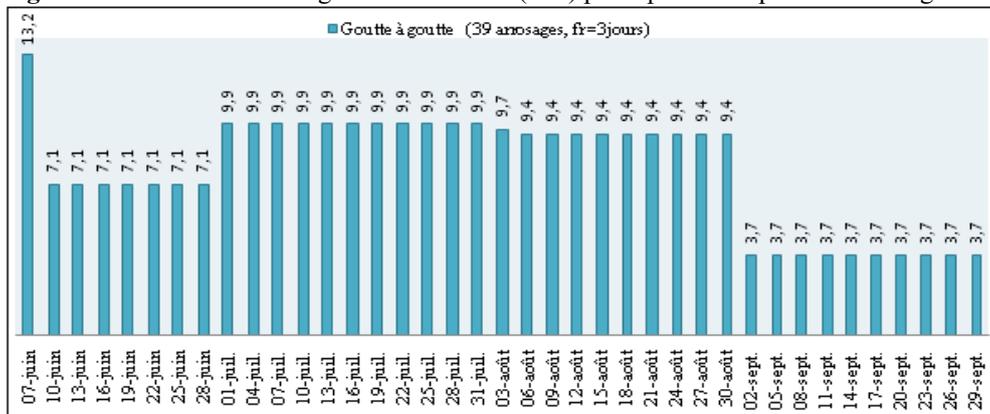


Figure 4: Calendrier d'arrosage à dose variable (mm) par goutte à goutte des agrumes.

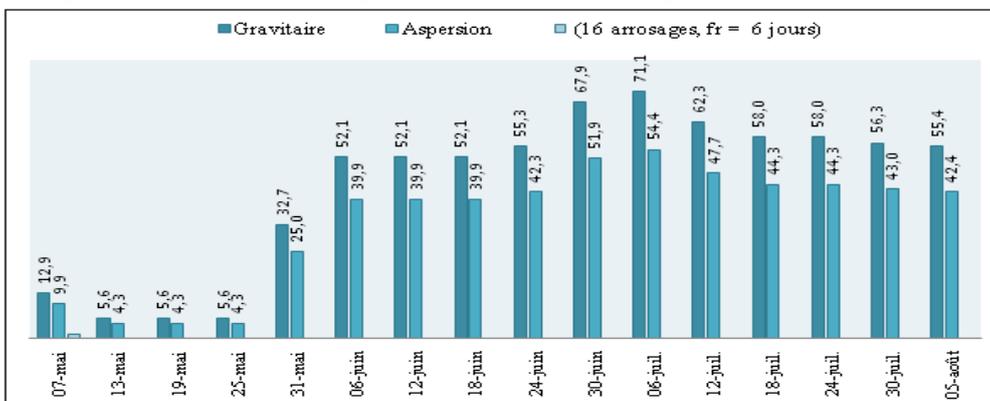


Figure 5: Calendrier d'arrosage à dose variable (mm) par aspersion et par sillon de la pomme de terre.

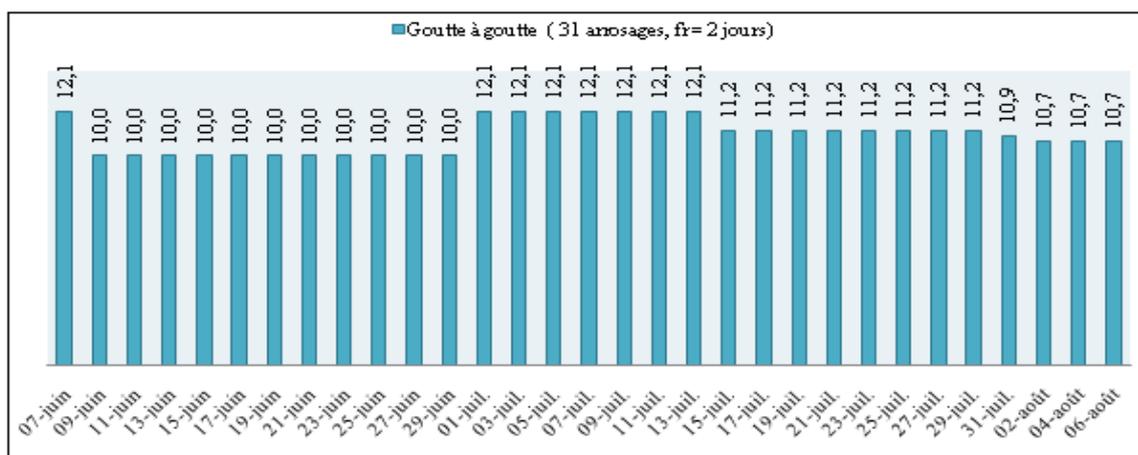


Figure 6: Calendrier d'arrosage à dose variable (mm) par goutte à goutte de la pomme de terre.

Comparaison des calendriers d'arrosage

Les résultats des calendriers à dose fixe et à dose variable ci-dessus sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4. Doses totales par campagne d'irrigation selon les calendriers à dose fixe et à dose variable et nombre d'irrigation (-) par technique et par culture

Doses totales	Gravitaire	Aspersion	Goutte à goutte
Pomme de terre			
Dose fixe (mm)	621,5 (8)	475,3 (8)	375,3 (31)
Dose variable (mm)	703,0 (16)	537,6 (16)	339,4 (31)
Δ = Dose fixe-dose variable (mm)	- 81,4	- 62,3	+ 35,9
Ecart (%) = Δ *100/Dose	-13,10%	-13,10%	+ 9,55%
Agrumes			
Dose fixe (mm)	1009,2 (8)	771,8 (8)	409,53 (31)
Dose variable (mm)	1012,1 (12)	774,0 (12)	304,10 (39)
Δ = Dose fixe-dose variable (mm)	-2,9	-2,2	+ 105,4
Ecart (%) = Δ *100/Dose	- 0,29 %	- 0,29%	+ 25,74%

On constate que, par rapport au calendrier à dose variable, le calendrier à dose fixe est légèrement plus économique en eau, et ce dans le cas de l'aspersion et du gravitaire uniquement (-13,1% et -0,29%).

Ce type d'arrosage présente l'avantage de ne pas modifier l'hydraulique du réseau durant toute la campagne d'irrigation. Cependant, dans le cas du goutte à goutte, c'est plutôt le calendrier à dose fixe qui nécessite plus d'eau (+9,55% et +25,74%). Dans cette situation, c'est le calendrier à dose variable qui est le plus recommandé, notamment lorsque le système est automatisé (peu d'intervention humaine).

En ce qui concerne le nombre d'irrigations, représenté entre les parenthèses (-) dans le tableau 4, c'est l'irrigation à dose variable qui nécessite plus de jours d'arrosage, étant donné qu'on irrigue avec des doses très faibles réparties dans le temps, notamment dans les situations où les besoins en eau sont moins importants (stade de développement de la pomme de terre, la *RFU* suffisante en début de campagne d'irrigation, *ETP* faible).

Tableau 5. Résultats globaux par technique d'arrosage de la pomme de terre et des agrumes

Caractéristique de la parcelle	Agrumes			Pomme de terre		
Superficie	1 ha (100 m x 100 m)			1 ha (100 m x 100 m)		
Texture du sol	Limoneux argileuse			Argileuse		
Profondeur racinaire (m)	0,75			0,5		
Ru (mm/m)	164			151		
Espacement les lignes de cultures (m)	6 x 6 :(16 arbre/ligne)			0,75		
	Goutte à goutte	Aspersion sous frondaison	Gravitaire (sillons)	Goutte à goutte	Aspersion	Gravitaire (sillons)
Rendement hydraulique	0,95	0,85	0,65	0,95	0,85	0,65
Dose nette (mm)	12,55	82	82	11,50	50,5	50,5
Dose brute (mm)	13,20	96,5	126,15	12, 10	59,40	77,7
Espacement: rampe x goutteur	6 x 1,7			1,8 x1		
Nombre de goutteurs /rampe	64			100		
Nombre de rampes/lignes	1/1			1 / 2		
Nombre de rampes/ha	16			55		
Nombre de goutteurs/ha	1024			5500		
Débit d'un goutteur (l/h)	8			2		
Pression (bar)	1			1		
Débit de la rampe (m ³ /h)	0,512			0,2		
Débit total (m ³ /h)	8,2			11		
Espace entre asperseurs		6 x 6			10 x 10	
Portée du Jet $R\sqrt{2}$ (m)		4,25			7	
Nombre d'asperseurs/rampe		16			10	
Nombre de rampes/ligne		1/1			1 / 13	
Nombre de rampes/ha		16			10	
Nombre d'asperseurs/ha		256			100	
Débit d'asperseur (m ³ /h)		0,64			1,5	
Pression (bar)		3,5			3	
Pluviométrie (mm/h)		17,7			15	
Débit de la rampe (m ³ /h)		10,24			15	
Débit total (m ³ /h)		163,8			150	
Espacement entre sillons (m)			2,40			0,9
Nombre de sillons/lignes			2/1			1 / 2
Nombre total de sillons			32			55
Débit en tête / sillon (l/s)			3			1,5
Débit total (m ³ /h)			345,6			297
Durée d'arrosage par jour (h)	15	5	3	11	4	2,5
Volume nécessaire par arrosage (m ³)	122,9	891,2	1036,8	121	600	742,5
Nombre de jours d'arrosage	31	8	8	31	8	8
Volume total nécessaire à la campagne d'irrigation (m ³)	3809,3	7129,6	8294,4	3751	4800	5940

Comparaison des durées, des débits et des volumes d'arrosage

Le tableau 5 montre que le rapport des débits, nécessaires à chaque irrigation, de l'aspersion et du gravitaire par rapport au débit du goutte à goutte est de 20 fois et de 42 fois plus important dans le cas des agrumes et de 14 et 27 fois dans le cas de la pomme de terre, respectivement. Ce qui représente également le nombre d'hectares qu'on pourra irriguer avec le goutte à goutte avec les débits relatifs à l'aspersion et au gravitaire. En outre, cela exigera de mobiliser un volume d'eau par arrosage (par jour) et par hectare, 7 à 8 fois plus important pour les agrumes et 5 à 6 fois pour la pomme de terre.

En ce qui concerne le pourcentage du volume d'eau globale ($\Delta V/V \times 100$), nécessaire pour couvrir toute la campagne d'irrigation, comparativement au goutte à goutte, l'aspersion et le gravitaire nécessiteront respectivement plus de 80% et plus de 110% dans le cas des agrumes et presque 30% et 60% pour la pomme de terre.

Cela s'explique par la technologie du goutteur qui fonctionne avec de faibles pressions et de faibles débits (2 et 8 l/h), qui offre la possibilité d'un apport d'eau localisé (goutte d'eau), et qui humidifie juste la zone racinaire (rhizosphère), en limitant ainsi les pertes d'eau qui caractérisent les autres techniques. De plus, son installation fixe lui permet également de répartir la dose dans le temps, comme le montrent bien les durées d'arrosage par jour : 3 fois plus élevée par rapport à l'aspersion et 5 fois par rapport au gravitaire, ainsi que le nombre de jours d'arrosage durant toute la campagne : 4 fois plus important.

CONCLUSION

L'étude réalisée concernant les trois modes d'arrosage, à partir de données identiques : relatives au sol, à la plante et au climat de la région, montre bien que le goutte à goutte constitue la solution incontournable pour une gestion rationnelle et pour la préservation des réserves en eau et des sols de la vallée du Sébaou, dont la vocation est essentiellement agricole.

Les résultats obtenus, selon cette approche, sont à l'échelle d'1 ha, les quantités d'eau à user seront encore plus considérables et ce proportionnellement à la superficie à irriguer.

Toute cette eau, excédentaire, peut être donc exploitée judicieusement pour irriguer d'avantage de terres agricoles ou bien pour satisfaire les besoins d'autres secteurs d'activités, ou tout simplement préservée, car son usage inutile est d'un impact anthropique considérable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), 2004. Annuaire de la nappe du Sébaou. ANRH/DRC., Algérie : 34 p.
- AQUASTAT, 2014. Le système mondial d'information sur l'eau de la FAO – Infographies sur les ressources en eau et leur utilisation, Note d'information. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/catalogues/indexfra.stm>
- BOUAÏTTA A., 1993. Étude de cas : La vulgarisation des nouvelles techniques de production de la pomme de terre dans la wilaya de Tizi-Ouzou. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 2: 133-142.
- BROUWER C., PRINS K., KAY M. & HEIBLOEM, M., 1990. Gestion des eaux en irrigation, Méthodes d'irrigation. Manuel de formation n° 5. FAO, Rome, 74 p.
- CHEVERRY C. & ROBERT M., 1998. La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée. *Etude et Gestion des Sols*, 5: 217-226.
- DECHEMI N. & CHAMBAZ H., 1994. La prévision des crues du bassin versant de l'Oued Dis (Sébaou) par la méthode DPFT. *Revue des Sciences de l'Eau*, 7: 331-342.
- DSA (Direction des services agricoles), 2010. Situation générale du secteur de l'agriculture, Wilaya de Tizi Ouzou, Algérie, 55 p.
- DUCROCQ M., 1990. Les bases de l'irrigation. Paris: Tec et Doc. Techniques agricoles et méditerranéennes, Nouv. Ed.: 117 p.
- DUNGLAS J., 2014. Les techniques d'irrigation. Académie d'Agriculture de France (AAF), France, 6 p.
- ELBOUQDAOUI K., HAIDA S., ABOULABBES O., BENAABIDA L., ZAHRAOUI M. & OZER A., 2006. Evolution du régime pluviométrique et hydrométrique du bassin versant du Srou (Moyen Atlas, Maroc). *Geo-Eco-Trop*, 30: 41-56.
- FAO, 1973. L'irrigation goutte à goutte. *Bulletin irrig. drain., FAO n°14*, Rome, 146 p.
- GEMENNE F., BLOCHER J., DE LONGUEVILLE F., VIGIL DIAZ TELENTI S., ZICKGRAF C., GHARBAOUI D. & OZER P. 2017. Changement climatique, catastrophes naturelles et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop*, 41, 3 : 317-337
- LADEL J., 2013. Water uses adaptation in Africa and impact of water resources availability on several African communities. *Geo-Eco-Trop*, 37: 285-292.
- RIEUL L., 2003. Guide pratique irrigation. Centre National du Machinisme Agricole, du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Cemagref, Editions Quae, France, 344 p.
- SCHAAP M.G., 2002. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Department of soil, Water and Environmental Science, Arizona*, version 1.2, 6 p.

- SOUTTER M., MERMOUD A. & MUSY A., 2007. Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagements. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 294 p.
- VAN GENUCHTEN M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- VAN LAERE P.E., 2003. Mémento de l'irrigation, Collection Manuels Techniques. Ingénieurs Sans Frontières, (ISF), Direction Générale de la Coopération Internationale (DGCI), Bruxelles, 15 p.
- VERMEIREN L., 1983. L'irrigation localisée : calcul, mise en place, exploitation, contrôle du fonctionnement. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 36, FAO, Rome, 219 p.
- ZELLA L. & SMADHI D., 2007. Evolution de l'irrigation. *Larhyss Journal*, 6: 65-80.

