

Effet du déficit hydrique sur la croissance, le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez la luzerne (*Medicago sativa* L.) au Tadla

B. BOUZZAMA^{1,2}, A. BOUAZIZ³, D. XANTHOULIS¹, A. BAHRI²

(Reçu le 27/02/2015; Accepté le 16/03/2015)

Résumé

L'étude de la réponse des cultures au déficit hydrique est importante dans les zones où les ressources en eau sont limitées. Cette étude a été réalisée sur la période 2009-2011 dans l'objectif d'étudier l'effet du déficit hydrique sur la productivité de la luzerne dans le périmètre de Tadla. Sous irrigation gravitaire, quatre régimes hydriques (100 %, 80 %, 60 % et 40 % ETc) ont été comparés. Sous irrigation localisée, ces mêmes régimes ont été associés à deux écartements entre rampes (50 cm et 75 cm). Les observations ont porté sur le sol, le système racinaire et la biomasse à chaque coupe. Les résultats ont montré que le rendement annuel maximal moyen obtenu est de 23,2 T.ha⁻¹. La contribution des cycles de printemps au rendement annuel varie de 55% sous le régime 100% ETc à 65% sous 40% ETc. Les rendements de la luzerne dépendent, en plus des quantités d'eau apportées, de l'emplacement des apports à l'intérieur d'un cycle. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie d'un cycle à l'autre et d'une saison à l'autre. Elle est maximale au printemps et faible en hiver. L'irrigation localisée permet de réaliser des rendements similaires à l'irrigation gravitaire avec moins d'eau et plus d'efficacité agronomique.

Mots clés: Luzerne, Déficit hydrique, Irrigation gravitaire, Micro irrigation, Efficacité d'utilisation de l'eau, Maroc.

Abstract

The study of crop response to water deficit is important in areas where water resources are limited. This study was conducted over the period 2009-2011 with the aim to study the effect of water deficit on alfalfa productivity in the irrigated perimeter of Tadla. Under flood irrigation, four water regimes (100%, 80%, 60% and 40% ETc) were compared. Under drip irrigation, the same regimes were associated with spacing between ramps (50 cm and 75 cm). Observations were made on the soil, root system and dry biomass at each cut. The results showed that the average maximum biomass yield was 23.2 T.ha⁻¹. The contribution of the spring cycles to annual yield varies from 55% under 100% ETc to 65% under 40% ETc. In addition to amount of water, alfalfa productivity depend also on the moment when water is applied within a cycle. The water use efficiency varies from one cycle to another and between seasons. It is highest in spring and lowest in winter. Drip irrigation, in comparison with flood irrigation, allows similar biomass yield but with less water and more agronomic efficiency.

Keywords: Alfalfa, Water deficit, Flood irrigation, Micro irrigation, Water use efficiency, Morocco.

INTRODUCTION

La luzerne (*Medicago sativa* L.) est la plus ancienne culture pratiquée uniquement pour son fourrage (Michaud *et al.*, 1988). En raison de sa morphologie, ses caractéristiques physiologiques et sa diversité variétale, elle reste la plus répandue dans le monde entier (Barnes *et al.*, 1988). Dans les régions humides, la pluie est suffisante pour assurer des rendements économiquement acceptables alors l'irrigation constitue un impératif dans les zones à climat aride à semi-aride (Grimes *et al.*, 1992).

Dans le périmètre irrigué de Tadla, l'élevage bovin laitier constitue un secteur fondamental de développement. Dans cette zone à climat semi-aride, la luzerne reste de loin la principale culture fourragère et s'étend sur plus de 22.000 ha, soit 80% de la surface occupée par les fourrages. Les emblavements par cette culture connaissent une augmentation annuelle continue d'environ 6,8% (ORMVAT, 2012).

Étant une culture pérenne (4 à 5 ans), la consommation annuelle en eau de la luzerne est importante lorsque la disponibilité en eau dans le sol est adéquate. Ce fourrage a des besoins en eau élevés en comparaison à d'autres cultures (Krogman and Hobbs 1965; Blad and Rosenberg 1976). En période de pénurie de l'eau, la concurrence sur les ressources hydriques devient aiguë entre l'usage agricole et urbain et met en question l'alimentation des cultures ayant des besoins hydriques élevés, telles que la luzerne.

De part le monde, plusieurs études ont montré la linéarité de la relation entre la biomasse produite et la consommation en eau chez la luzerne (Bauder *et al.*, 1977; Sheaffer *et al.*, 1988; Grimes *et al.*, 1992). Cependant, cette relation varie en fonction du climat (Hill *et al.*, 1983), de la variété, d'une saison à l'autre et d'une coupe à l'autre durant la même saison de croissance (Myer *et al.*, 1991). Malgré son introduction depuis longtemps au Maroc, les travaux de recherche sur l'irrigation de la luzerne, notamment

¹ Unité d'Hydraulique et d'Hydrologie, Université de Liège Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgique

² Centre Régional de la Recherche Agronomique de Tadla, INRA, Beni Mellal, Maroc

³ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

l'efficacité d'utilisation de l'eau par cette culture sont encore peu connus.

L'objectif de ce travail est d'étudier, sous l'irrigation gravitaire et localisée, la réponse de la croissance et du rendement en biomasse de la luzerne vis-à-vis de quatre régimes d'irrigation contrastés et de déterminer l'efficacité d'utilisation de l'eau sous ces régimes hydriques.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude a été réalisée sur la période 2009-2012 au domaine expérimental de l'INRA, situé au périmètre irrigué de Tadla ($X = 32.3^\circ$; $Y = 6.31^\circ$; $Z = 450$ m). Le sol de la zone d'étude appartient à la classe luvisol chromique (Badraoui *et al.*, 2001). Le climat est de type aride à semis aride avec une saison humide de novembre à mars et une saison sèche d'avril à octobre. La température moyennes annuelle est de 18°C avec un maximum de 45°C en août

et minimum 0°C en janvier. La moyenne annuelle des précipitations est de 240 mm sur la période 1996-2007. L'été connaît également l'arrivée de vents chauds appelés localement *Chergui*. Le tableau 1 donne quelques paramètres climatiques du site d'expérimentation durant les trois années d'expérimentation. Les données climatiques sont collectées à partir d'une station climatique automatique, située près des parcelles d'essais.

Avant le démarrage des essais, des échantillons de sol ont été collectés sur les horizons 0-30, 30-60 et 60-120 cm pour analyses au laboratoire. Quelques caractéristiques physiques et chimiques du sol de la parcelle d'expérimentation ont été déterminées et données dans le tableau 2. L'eau d'irrigation, provenant d'un barrage situé à 20 km, est de bonne qualité avec une conductivité électrique de 0,4 dS/m et un pH de 7,2.

L'essai a été réalisé sur deux parcelles séparées mais côte à côte. La première est alimentée par l'irrigation gravitaire et

Tableau 1: Données climatiques pour la période d'étude (2009-2011), mesurées au niveau du site d'essai

Mois	Température moyenne						ET0			Précipitation		
	Min.			Max.			2009	2010	2011	2009	2010	2011
	2009	2010	2011	2009	2010	2011						
Janvier	4,3	5,8	3,7	14,6	17,4	20,0	36,7	38,0	44,3	125,7	117,9	29,6
Février	5,4	9,0	3,6	19,0	19,0	19,9	64,6	48,4	59,9	82,5	107,8	0,0
Mars	9,1	9,8	6,1	21,5	21,9	21,2	93,6	77,3	86,5	83,6	65,3	74,5
Avril	8,1	12,0	12,1	23,7	26,5	29,1	126,0	114,4	130,3	0,0	12,0	21,6
Mai	13,2	12,2	11,9	30,1	28,7	27,8	183,8	152,1	127,2	2,6	7,0	85,6
Juin	17,0	15,3	21,5	33,9	31,7	39,6	203,8	176,2	158,4	16,7	0,0	3,0
Juillet	22,5	20,8	29,2	40,9	38,2	46,1	235,8	196,7	187,3	0,0	0,0	0,0
Août	23,6	21,6	24,4	40,2	39,3	39,5	207,1	137,7	153,2	0,0	0,0	8,0
Septembre	16,4	18,4	15,2	29,6	33,8	34,8	127,0	123,1	144,1	13,0	0,0	0,0
Octobre	14,1	13,3	10,4	31,9	26,1	31,3	97,5	80,6	98,0	9,6	51,1	53,0
Novembre	9,4	9,1	7,9	25,4	22,0	22,1	56,3	49,3	59,0	0,0	35,5	134,9
Décembre	7,0	7,0	3,9	20,0	20,2	23,3	37,6	44,0	48,0	83,8	83,8	3,4

Tableau 2: Caractéristiques physico-chimiques du sol de la parcelle d'essais

Caractéristique	Horizon		
	0 - 30	30 - 60	60 - 120
Argile (%)	27,7	43,3	47,4
Limon fin (%)	3,9	15,9	16,6
Limon grossier (%)	49,2	2,8	19,3
Sable fin (%)	12,3	11,2	11,3
Sable grossier (%)	5,7	27,6	6,1
Matière organique (%)	1,91	1,08	1,08
pH	7,97	8,22	8,43
Conductivité électrique (mS/cm)	1,03	0,45	0,53
Humidité à la capacité au champ (%)	27,3	27,8	26,7
Humidité au point de flétrissement (%)	16,2	16,7	16,1
Densité apparente	1,38	1,46	1,57

découpée selon un dispositif expérimental en bloc aléatoire complet avec trois répétitions. Sur cette parcelle, le facteur étudié est le régime hydrique. Quatre régimes hydriques, définis sur la base de coefficients qui affectent l'ETc de la luzerne, ont été comparés. Ces régimes sont 100%, 80%, 60% et 40% ETc pour T1, T2, T3 et T4 respectivement.

La deuxième parcelle sous micro irrigation est dimensionnée selon un plan en Split plot. Le facteur régime hydrique avec les mêmes traitements que la parcelle en gravitaire (T1, T2, T3, et T4) est affecté aux unités primaires alors que les unités secondaires ont été affectées au facteur écartement entre rampes. Deux écartements ont été testés, E1 = 50 cm et E2 = 75 cm. Les goutteurs sont intégrés, espacés de 40 cm sur la rampe et ont un débit nominal de 2 l/h. A l'entrée de chaque placette primaire, une électrovanne et un compteur sont installés.

La variété de luzerne *Super siriver* a été semée selon une dose de 35 kg/ha le 24/04/2009, au moyen d'un semoir réglé. Avant le semis, environ 70 kg/ha de N et 150 kg/ha de P₂O₅ ont été apportés et enfouis dans le sol des deux parcelles. Des traitements phytosanitaires ont été appliqués au besoin pour limiter l'effet des ravageurs tels que l'escargot au printemps et le *prodenia* en été. La superficie totale des deux parcelles d'essai s'étend sur environ 5.850 m².

Sous l'irrigation gravitaire, l'eau est apportée moyennant des bassins de 60 m² (5*12 m). Des espacements (bordure) de 10 m ont été envisagés afin d'éviter les mouvements de l'eau entre les traitements comparés. A chaque irrigation, un débit moyen de l'ordre de 12 l/s est réglé en aval de la pompe. L'eau est arrêtée lorsque le bassin est totalement rempli.

Le déficit hydrique théorique (DHT, mm) par régime hydrique est calculé par:

$$DHT = K_{c,ajust} * ET_0 * kr$$

Avec:

$K_{c,ajust}$: Coefficient cultural ajusté de la luzerne

ET_0 : Evapotranspiration de référence (mm j⁻¹)

kr: Coefficient de réduction qui définit les traitements d'irrigation. Il est pris égal à 1; 0,8; 0,6 et 0,4 pour T1, T2, T3 et T4 respectivement.

Le calcul de l' ET_0 est réalisé moyennant la formule de FAO Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998). Le déclenchement de l'irrigation gravitaire a lieu pour chaque régime hydrique une fois le cumul de DHT atteint 35 mm durant l'année d'installation et 75 mm pour les deux campagnes 2010 et 2011. Cette stratégie de déclenchement de l'irrigation s'est traduite par des intervalles et nombre d'irrigations variables selon les traitements comparés.

Sous l'irrigation localisée, la dose nette d'irrigation (DNI, mm) est calculée par la relation suivante (Vermeiren et Jobling, 1983):

$$DNI = DHT * E * 1/CU$$

Avec E est l'inverse du rendement de l'irrigation (pris égal à 1,1), CU est le coefficient d'uniformité de l'irrigation mesuré au début de chaque campagne.

La durée d'irrigation est calculée par la formule:

$$T = \frac{DNI}{P_f} \text{ en (h, mn)}$$

P_f : la pluviométrie fictive (mm/h) donnée par la formule:
 $P_f = n * Q$

Avec n est le nombre de goutteurs par m² et Q est le débit réel moyen du goutteur mesuré au début de chaque campagne agricole.

L'eau est apportée tous les deux à trois jours pour tous les régimes hydriques. L'utilisation des formules de calcul précédemment évoquées se traduit par des durées d'irrigation variables entre traitements (décroissante de T1 à T4).

Sous les deux techniques d'irrigation, l'évapotranspiration réelle de la culture est estimée en utilisant l'équation du bilan hydrique donnée comme suit:

$$ETR = P + I \pm \Delta S - D$$

Dans laquelle ETR est l'évapotranspiration réelle de la culture (mm), P est la pluie (mm), I est la dose d'irrigation apportée (mm), D est la perte par drainage au-delà de la zone racinaire (mm), ΔS est la variation du stock en eau.

La teneur en humidité dans le profil du sol est mesurée par la méthode gravimétrique avant chaque irrigation et à chaque coupe. La méthode gravimétrique a été utilisée moyennant des prélèvements au niveau des horizons 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 et 100-120 cm. Le ruissellement est négligé (irrigation localisée et gravitaire par des bassins à extrémité bloquée par des ados). Sous le gravitaire, des mesures supplémentaires d'humidité ont été réalisées moyennant des capteurs capacitifs de type ECHO2 -EC5 (*Decagon*) durant 2010 et des sondes de type *Sentek Diviner* en 2011 après leurs étalonnages sur terrain.

La variation du stock en eau dans la zone racinaire est calculée entre deux coupes de la luzerne. Le calcul du gain ou la perte en eau entre deux coupes est donné par la formule suivante:

$$\Delta S = (S2 - S1) da * Z/100$$

Où S1 et S2 sont l'humidité initiale et finale (%) dans l'horizon du sol respectivement, da est la densité apparente (g cm⁻³), et Z est l'épaisseur de l'horizon considéré (cm). La densité apparente a été mesurée par la méthode du cylindre pour chaque horizon. Le drainage est donné par les sorties du modèle CropSyst après sa calibration et validation (Bouazzama, 2013). Des tensiomètres sont installés sous chaque régime aux profondeurs 20, 40, 60, 80, 100 et 120 cm. Le suivi de la charge hydraulique a pour objectif de localiser les plans de flux nul et d'apprécier l'état du stress hydrique au niveau du profil du sol pour chaque régime hydrique.

La récolte a lieu lorsque les plants de la luzerne sous le régime T1 (100% ETc) en gravitaire atteignent la floraison totale pour la 1^{ère} coupe et environ 30% de floraison pour les coupes suivantes. A chaque coupe, le rendement est déterminé sur trois placettes de 9 m² au niveau de chaque répétition et au niveau de tous les traitements. Chaque échantillon fait l'objet de mesures du poids total de la matière verte et de la hauteur des plants. Une partie de la matière verte (environ 1 kg) est pesée puis mise à l'étuve à 80°C pendant 72 h pour

la peser de nouveau et calculer le taux de matière sèche. En plus des mesures à la coupe, des mesures supplémentaires de rendement en biomasse sont réalisées sous le gravitaire entre deux coupes successives sur des placettes de 4 m². Chaque mesure est associée à la mesure du taux de matière sèche. Avant chaque coupe et entre deux coupes, l'indice foliaire est mesuré moyennant un appareil LI COR 2200.

L'analyse statistique a été réalisée moyennant le logiciel Minitab. La comparaison des moyennes a été réalisée par la méthode LSD.



Photo 1: Parcelle d'essai sur la luzerne conduite en gravitaire



Photo 2: Essai d'irrigation localisée de la luzerne: régime hydrique associé à l'écartement entre rampes

RÉSULTATS DE L'ESSAI SOUS IRRIGATION GRAVITAIRE

Effet du régime hydrique sur la distribution de l'humidité dans le profil du sol

Sur la période d'essai s'étendant sur avril 2009 - novembre 2011, 20 cycles de croissance ont été réalisés et définis dans le tableau 3. Les teneurs en eau dans la figure 1 sont des valeurs moyennes mesurées à différents horizons sous chaque régime hydrique. Les profils d'humidité présentés concernent les mesures réalisées avant les irrigations durant les différents cycles. Les valeurs moyennes de HpF et Hcc sont de 16,2 et 28,1% respectivement.

Les graphes établis en 2010 et 2011 montrent que les rabattements d'humidité descendent vers les horizons profonds. Les teneurs en humidité moyennes sont significativement (P=0,05) supérieures sous T1, suivi de T2 qui dépasse celles sous T3 et T4. Sous ces derniers régimes, les teneurs au niveau des horizons de surfaces ou même plus en bas descendent au-delà de l'humidité au point de flétrissement. L'importance des fissures sous les régimes moins irrigués T4 et T3 accentue davantage les pertes en eau par évaporation en profondeur.

Pour mieux expliquer la variabilité du rabattement de l'humidité en fonction des horizons, nous avons établi sous le régime T1; les profils racinaires à deux dates différentes (janvier 2010 et février 2011) (Figure 2). La distribution des racines en début de 2010 sous T1 montre que plus de 80% de la masse racinaire est localisée dans les 50 cm de surface. La distribution de l'humidité au delà de cette profondeur accuse peu de variation entre les régimes hydriques (figure 1a). En février 2011, le système racinaire a atteint 115 cm de profondeur. Les profils établis en 2011 montrent que le rabattement de l'humidité concerne tout le profil où les prélèvements du sol ont été effectués. Ceci montre que le système racinaire aurait dépassé 120 cm de profondeur.

L'étude menée par Abdul Jabbar *et al.*, (1982) sur la distribution du système racinaire de la luzerne en fonction de l'humidité du sol, a montré que sous les différents niveaux d'humidité, la masse racinaire est concentrée dans les 45 cm de profondeur et que les différences entre niveaux d'humidité sont plus élevées dans cette tranche du sol. Bennett et Doss (1960) ont étudié l'enracinement de deux cultivars de la luzerne sous trois régimes d'humidité du sol à Thorsby aux USA et ont conclu que la profondeur racinaire maximale était de 120 cm et que la teneur en racine augmente légèrement avec le stress hydrique.

Tableau 3: Désignation des cycles de croissance de la luzerne sur la période d'essai

Campagne	N° coupe/année	N° cycle	Début	Fin
2009	1	1	24/04/09	01/07/09
	2	2	02/07/09	30/08/09
	3	3	31/08/09	28/10/09
	4	4	29/10/09	03/01/10
2010	1	5	04/01/10	16/03/10
	2	6	17/03/10	19/04/10
	3	7	20/04/10	18/05/10
	4	8	19/05/10	16/06/10
	5	9	17/06/10	12/07/10
	6	10	13/07/10	17/08/10
	7	11	18/08/10	21/09/10
	8	12	22/09/10	07/11/10
2011	1	13	08/11/10	20/01/11
	2	14	21/01/11	22/03/11
	3	15	23/03/11	25/04/11
	4	16	26/04/11	30/05/11
	5	17	31/05/11	25/06/11
	6	18	26/06/11	03/08/11
	7	19	04/08/11	14/09/11
	8	20	15/09/11	01/11/11

Tableau 4: Nombre d'irrigations et volume d'eau apporté par régime hydrique

Traitement	2009		2010		2011	
	Nombre d'irrigations	Volume apporté (mm)	Nombre d'irrigations	Volume apporté (mm)	Nombre d'irrigations	Volume apporté (mm)
T1	14	1810	13	1606	13	1656
T2	10	1369	10	1290	8	1188
T3	8	1177	7	994	6	1061
T4	5	643	4	713	3	544

Bilan hydrique

La différenciation des apports en eau entre les régimes hydriques à partir du 2^{ème} cycle de 2009 fait que le nombre d'irrigation et les volumes en eau apportés varient d'un régime à l'autre comme illustré dans le tableau 4.

Durant les périodes d'absence des pluies, les pertes en eau par drainage sont d'autant plus importantes quand les doses d'irrigation sont élevées. Cependant, le rapport des pertes par drainage sur le nombre d'irrigation appliqué par régime hydrique montre sa diminution avec la fréquence d'irrigation. Les valeurs moyennes obtenues en combinant les valeurs de 2010 et 2011 sont de 38,5, 41,3, 45,3 et 51,1 mm pour T1, T2, T3 et T4 respectivement. Cette tendance montre que la fréquence d'irrigation réduit les pertes par drainage. Le tableau 5 récapitule les volumes de drainage pour les trois campagnes (sortie du modèle CropSyst).

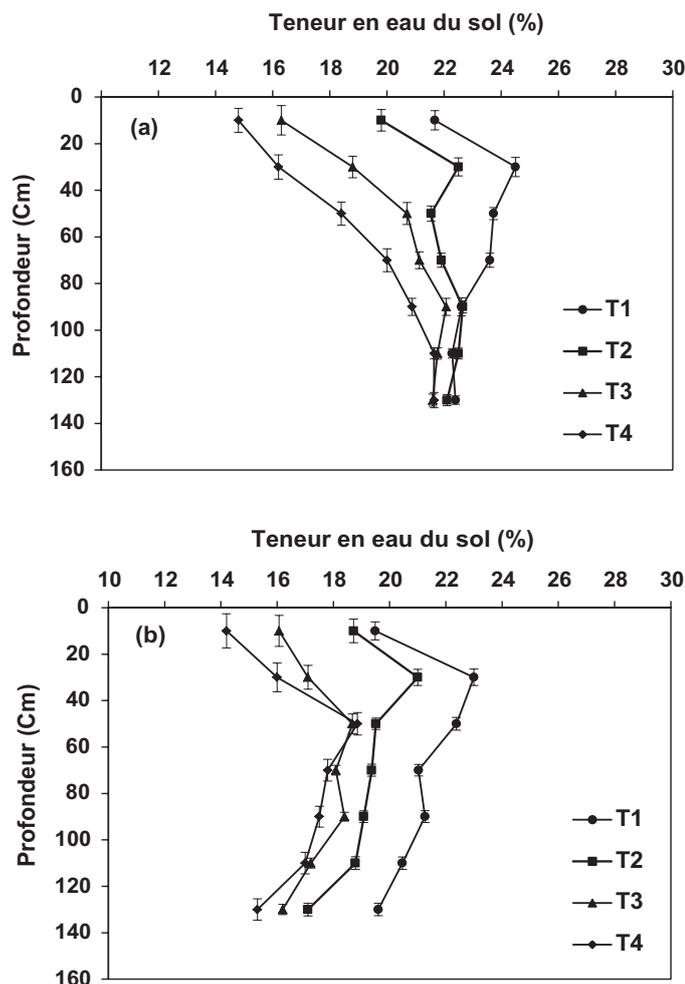


Figure 1: Teneur en eau moyenne à différents horizons par régime hydrique. Humidité mesurée avant irrigations appliquées en a) 2010 et b) 2011

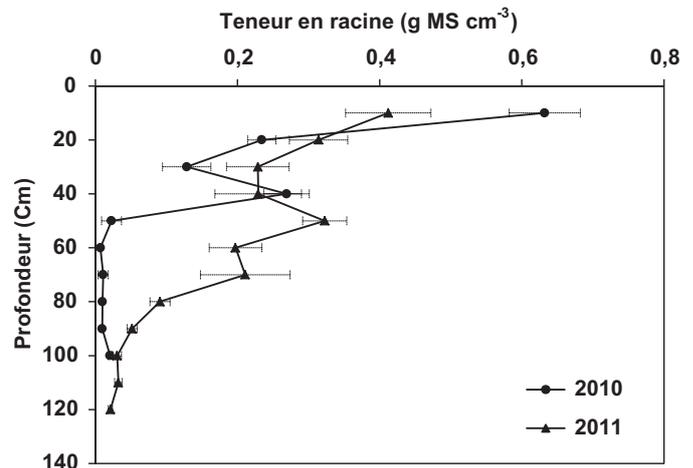


Figure 2: profils racinaire sous le régime hydrique T1 (100% ETc)

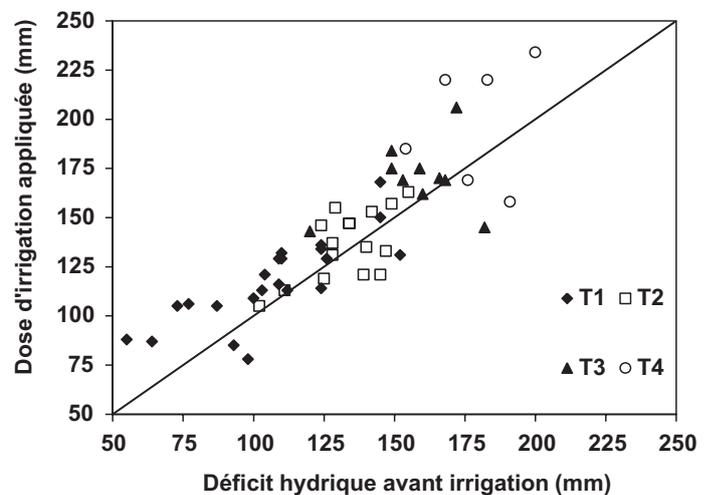


Figure 3: Confrontation des doses d'irrigation et les déficits hydriques avant irrigation

Tableau 5: Pertes en eau moyenne par drainage (mm) au delà de 120 cm de profondeur

Campagne	T1	T2	T3	T4
2009	861	598	500	273
2010	624	422	246	182
2011	395	269	195	130

L'année d'installation de la luzerne (2009) a connu les pertes les plus importantes en relation avec le nombre important d'irrigations apportées pour permettre à la culture

de se développer face à une demande climatique importante qui sévit durant les mois d'été qui suivent le semis.

Pour les deux autres campagnes 2010 et 2011, les pertes sont relativement diminuées et ont eu lieu surtout durant les périodes pluvieuses. Sachant que les hauteurs des pluies enregistrées sont de 384 et 258 mm en 2010 et 2011 respectivement et sont concentrées sur la période décembre-février. La confrontation des déficits hydriques avant irrigation et les doses appliquées sur les périodes Avril-Novembre de 2010 et Mars-Novembre de 2011 pour les différents traitements est illustrée par la figure 3. A partir de cette figure, les déficits hydriques moyens atteints avant irrigation sont inférieurs à 110 mm sous T1, varient entre 100 et 143 mm sous T2, entre 132 et 164 mm sous T3 et dépassent 175 mm sous T4. La tendance générale est l'application de doses d'irrigation plus élevées que les déficits, surtout sous T3 et T4. La fissuration des sols accentuée sous ces régimes explique en partie les surplus d'eau appliquée.

Effet du régime hydrique sur la croissance

La distribution des valeurs de LAI mesurées à la veille de chaque coupe, durant deux campagnes d'essai, est donnée par la figure 4. L'effet du stress hydrique sur la croissance foliaire est significatif ($P = 0,05$) durant les cycles où les régimes hydriques sont différenciés. Le régime le plus stressant T4 s'est traduit par des valeurs faibles de LAI dans presque toutes les coupes. Le traitement T1 a des valeurs plus élevées que celles sous T2 dans 15 coupes. Sous tous les traitements, les valeurs de LAI les plus élevées sont enregistrées durant les cycles de printemps (cycle 7, 8, 16 et 17) alors que les minima sont mesurés en été (cycle 10 et 19). Les valeurs de LAI de la luzerne mesurées par Saeed et El Nadi (1997) au Soudan sous des conditions hydriques favorables varient entre 0,78 en juillet à 4,8 en fin Février.

La vitesse de mise en place de l'indice foliaire dépend principalement de l'état de croissance des bourgeons et les petites tiges après une coupe. L'étude de la dynamique de repousses de luzerne par Duru et Langlet, (1989) a mis en évidence l'importance de la phase qui suit la coupe. Selon ces auteurs, les écarts de croissance liés à la vitesse de mise en place de l'indice foliaire ne se rattrapent pas par la suite. D'un point de vue pratique, la phase d'installation de l'indice foliaire est d'un grand intérêt notamment pour la réalisation des irrigations.

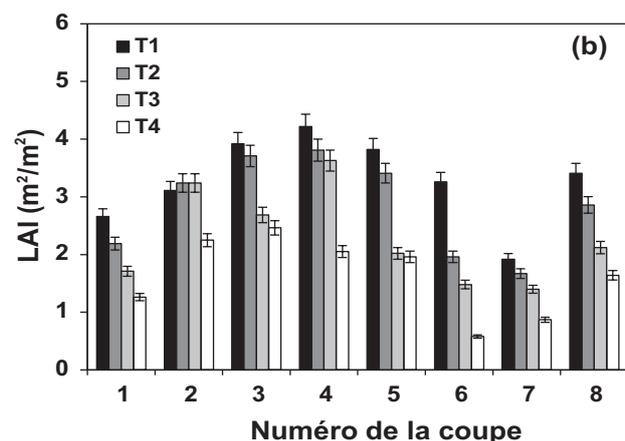
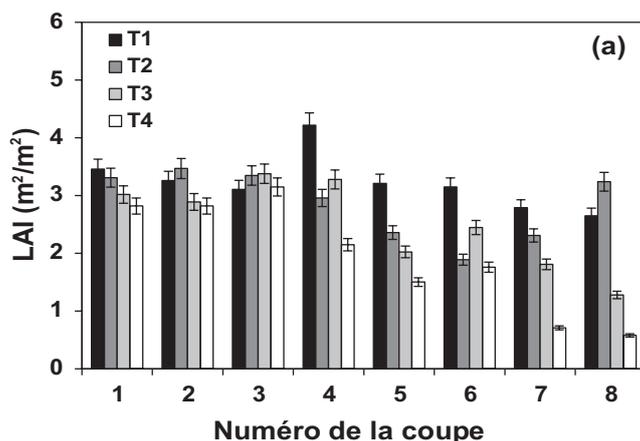


Figure 4: Évolution de LAI de la luzerne mesuré aux différentes coupes en a) 2010 et b) 2011

Effet du régime hydrique sur le rendement en biomasse à la coupe

L'évolution de la biomasse accumulée et récoltée à la fin de chaque cycle montre que, pour tous les traitements, les rendements les plus élevés sont enregistrés au printemps (avril et mai) alors que les faibles valeurs ont été observées aux coupes d'automne/hiver (Figure 5). La faible productivité de la luzerne en automne/hiver, bien que l'eau est abondante, est attribuée aux faibles températures qui ralentissent la croissance (Grimes *et al.*, (1992). Selon ces derniers auteurs, les rendements les plus élevés et obtenus pour trois variétés différentes de luzerne aux USA ont été observés sous les conditions fraîches du printemps.

Les rendements mesurés aux coupes réalisées en 2011 montrent que les rendements sous T4 sont toujours inférieurs aux autres traitements même dans les cycles où l'apport en eau est homogénéisé par les pluies (cas des cycles 13 et 14). Dans ces deux cycles, les rendements observés sont statistiquement égaux entre T2 et T3 et sont légèrement inférieures à celui sous T1. Ceci montre qu'à l'inverse du régime T3, le rendement sous T4 n'est pas récupéré même après des apports en eau abondants. Dans les cycles où les parcelles sous les régimes T2 et T3 reçoivent le même nombre d'irrigation, les rendements obtenus sont statistiquement égaux (cycle 18 et 19 en 2011). La diminution des rendements sous T4, sous le stress hydrique, semble être permanente et peut être attribuée à la perte de pieds de luzerne. Le peuplement (nombre de pied par m^2) mesuré au niveau de la parcelle au 28 mars 2011 était de 83 plants m^{-2} sous T1, 67 plants m^{-2} sous T2, 61 plants m^{-2} sous T3 et 42 plants m^{-2} sous T4. Sachant que le nombre moyen mesuré en 19 février 2010 est de 95 plants m^{-2} . L'analyse statistique montre que le peuplement sous T4 est significativement ($P = 0,05$) inférieur à celui mesuré sous T3.

L'effet du déficit hydrique sévère constaté sous le régime hydrique T4 dans le cadre de cette expérimentation est en concordance avec les résultats obtenus par Ottman *et al.*, (1996) aux USA. Ces auteurs ont montré que le stress hydrique estival aigu cause des pertes des pieds de luzerne et une diminution permanente des rendements. La perte de peuplement chez la luzerne a été attribuée à la diminution des teneurs en carbohydrates causée par le stress hydrique et les coupes fréquentes (Feltner et Massengale, 1965; Robison et Massengale, 1968).

Les rendements de la luzerne dépendent en plus des quantités d'eau apportées de l'emplacement des apports à l'intérieur d'un cycle. En prenant les cycles où les apports en eau sous T2 et T3 sont égaux, et appliqués à des moments différents; on confirme cette tendance. Dans le cycle 9 en 2010, les deux régimes ont reçu une irrigation au même jour après la coupe du 17/6/2010. L'apport supplémentaire réalisé en faveur de T2 au 08/7/2010 (une semaine avant la coupe du 17/07/2010) n'a pas beaucoup d'effet puisque les rendements obtenus sous ces deux régimes sont statistiquement égaux. À la coupe du 04/08/2011, le rendement obtenu sous T3 est supérieur en comparaison avec T2 bien que les deux régimes aient reçu la même quantité d'eau. L'irrigation sous T3 est réalisée au milieu du cycle alors que sous T2, l'eau est apportée en fin de cycle.

En combinant les valeurs de tous les régimes hydriques, le rendement en biomasse est bien corrélé ($R^2 = 0,74$) avec la hauteur des plants atteinte juste avant la coupe. L'indice foliaire mesuré avant la coupe est également bien corrélé ($R^2 = 0,85$) avec le rendement en biomasse.

Les rendements annuels obtenus sont récapitulés dans le tableau 6. Les valeurs obtenues sont dans l'ordre de grandeurs de celles obtenues sous des climats similaires. Sous le climat aride d'Idaho méridional, le rendement moyen obtenu par Wright, (1988) est de 17,6 t.ha⁻¹. Dans une étude menée dans la vallée de Californie, Grimes *et al.*, (1992) ont trouvé que le rendement maximal d'une luzernière sans stress hydrique est de 26 t.ha⁻¹. Au Soudan, Saeed et El Nadi (1997) ont trouvé que le rendement atteint sans stress hydrique est de 15,3 t.ha⁻¹ en six coupes.

Tableau 6: Nombre de coupes et rendement total annuel (t.ha⁻¹) par régimes hydriques

Année	Nombre de coupes	T1	T2	T3	T4
2009	4	10,32	8,49	7,02	4,98
2010	8	23,14	18,26	17,60	12,89
2011	8	24,18	20,10	16,12	10,91

Le rendement annuel maximal obtenu pour la luzerne est presque similaire pour les deux années 2010 et 2011 avec une moyenne de 23,6 t.ha⁻¹. Ce rendement obtenu

avec une ETR de 1450 mm est similaire au rendement de la luzerne obtenu par Sammis (1981) à New Mexico qui est de 23 t.ha⁻¹ avec 1695 mm d'ETR. L'analyse de la variation de la production par saison montre qu'en 2010, la luzerne produit 47, 51, 50 et 62% de son rendement total aux coupes réalisées au printemps sous T1, T2, T3 et T4 respectivement. En 2011, ces pourcentages passent à 63, 70, 70 et 71% sous T1, T2, T3 et T4 respectivement.

Efficience d'utilisation de l'eau (EUE)

Le rendement total en fonction du cumul de l'eau consommée (ETR) pour chaque régime hydrique est illustré par la figure 6. La pente de la droite de régression donne l'efficacité d'utilisation de l'eau (kg.m⁻³) à l'échelle d'une période donnée (Tableau 7). Sous les différents régimes hydriques, les rendements en biomasse cumulés et l'évapotranspiration réelle sont bien corrélés avec des coefficients de corrélation significatifs dépassant 0,80. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie selon les régimes hydriques et varie d'une année à l'autre pour un même régime. Les faibles valeurs sont enregistrées pour la campagne 2009 avec des valeurs de l'EUE significativement ($P=0,05$) inférieures à celles obtenues en 2010 et 2011. Pour tous les régimes hydriques, les efficacités d'utilisation de l'eau en 2011 sont supérieures à celles de 2010 et dépassent de loin les valeurs obtenues en 2009.

Les faibles valeurs obtenues en première année sont attribuées au fait que le semis réalisé en fin avril 2009, a imposé l'application fréquente d'irrigation pendant l'été pour permettre la bonne installation du système racinaire qui est encore superficiel. Les fortes demandes climatiques, surtout pendant le premier cycle, provoquent des dessèchements rapides des horizons de surfaces associés à l'incapacité de la culture d'exploiter l'eau des horizons profonds. En 2009, les valeurs de l'EUE sous T1 dépassent celles sous T2, T3 et T4 par environ 14, 69 et 81% respectivement.

Les valeurs les plus élevées de l'EUE ont été enregistrées en 2011 pour tous les régimes. Les valeurs obtenues sont de 1,83, 1,67, 1,54 et 1,23 kg.m⁻³ sous T1, T2, T3 et T4 respectivement. En prenant tous les régimes combinés, l'EUE est de 1,74 et 1,54 kg.m⁻³ en 2011 et 2010

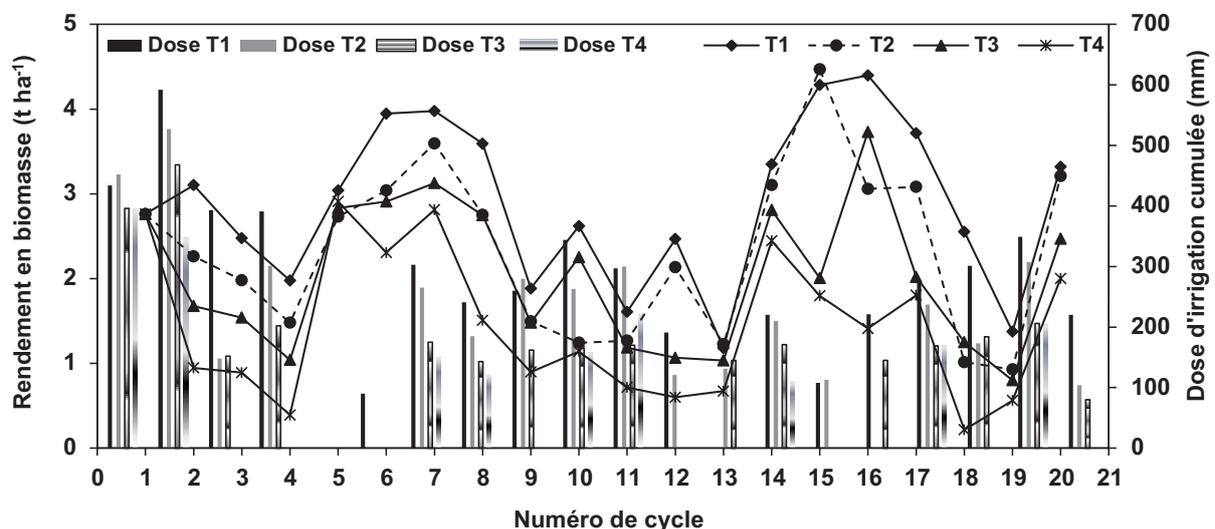


Figure 5: Évolution des rendements (t/ha) pour les différents cycles et par régime hydrique

respectivement. Étant donné que l'année 2009 est une année d'installation, l'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau de la luzerne au Tadla, est déterminée en combinant les résultats des deux campagnes 2010 et 2011 est de 1,62 kg.m⁻³.

L'efficacité d'utilisation de l'eau varie également d'une coupe à l'autre et d'une saison à l'autre. Elle est maximale au printemps et minimale en hiver. L'EUE moyenne calculée par saison et en combinant les différents régimes est de 2,14, 0,98, 0,94 et 0,71 kg.m⁻³ au printemps, l'été, l'automne et l'hiver respectivement. La valeur maximale est de 2,57 kg.m⁻³ et obtenue au printemps 2011. La faible valeur est de 0,64 kg.m⁻³ et obtenue en hiver 2010. La régression linéaire pour chaque régime hydrique et pour les deux campagnes 2010 et 2011 ont été présentées au tableau 7. Cette tendance est en concordance avec les résultats

obtenus par Bolger et Matches (1990). Selon ces auteurs, la valeur maximale obtenue au printemps était de 2,91 kg.m⁻³ alors que le minimum qui est de 0,63 kg.m⁻³ a été obtenu en hiver. Carter et Sheaffer (1983) ont aussi prouvé la réduction de l'EUE en hiver en raison du phénomène de dormance. Cependant, Sammis (1981) a obtenu des valeurs élevées de l'EUE en hiver. Les différences entre les variétés concernant la faculté de dormance expliquent les performances variables entre variétés.

Grimes *et al.*, (1992) ont trouvé que l'EUE maximale de la luzerne est de 2,63 kg.m⁻³ et est réalisée avec une consommation hydrique de 1000 mm (ETR). Bolger et Matches (1990) ont trouvé des valeurs relativement élevées de l'EUE (2,74 kg.m⁻³) en début de saison et 1,65 kg.m⁻³ pour toute la saison. Sammis (1981) a

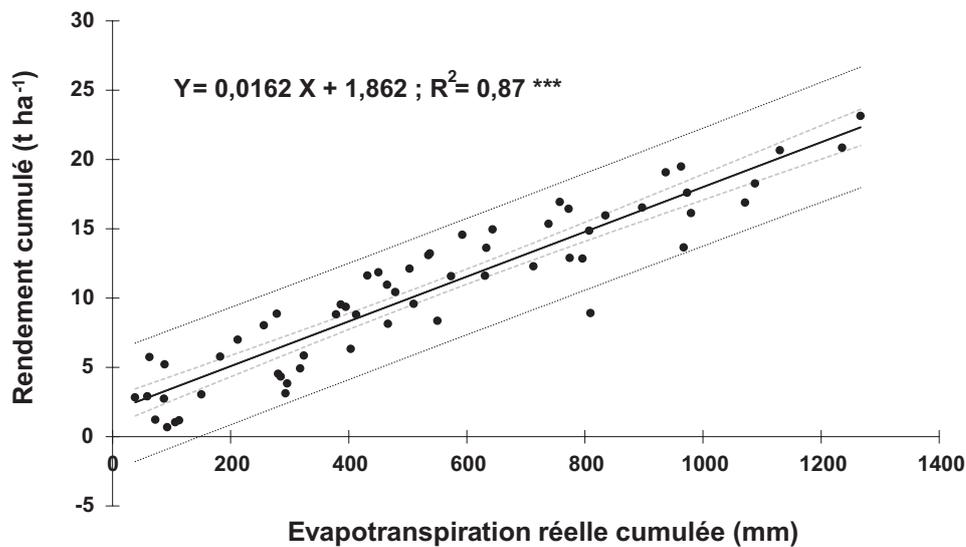


Figure 6: Relation entre rendement en biomasse cumulée et ETR cumulée (2010/2011)

Tableau 7: Coefficient de régression du rendement en biomasse cumulé en fonction de l'ETR cumulé par régime hydrique (Equation générale: biomasse = a ETR + b)

Année	Traitement	Coefficients de régression		R ²	n
		a	b		
2009	T1	0,0132	-1,4581	0,96***	4
	T2	0,0124	-0,9783	0,98***	4
	T3	0,0084	0,4952	0,96***	4
	T4	0,0061	1,2144	0,92**	4
2010	T1	0,0166	2,8518	0,96***	8
	T2	0,0143	3,2204	0,95***	8
	T3	0,0134	4,3201	0,96***	8
	T4	0,0126	3,8341	0,93***	8
2011	T1	0,0183	1,0012	0,93***	8
	T2	0,0167	1,5865	0,87**	8
	T3	0,0154	0,3201	0,93***	8
	T4	0,0123	0,6152	0,82**	8
2009	Tous les traitements	0,0092	-0,2056	0,93***	16
2010	Tous les traitements	0,0151	3,3688	0,94***	32
2011	Tous les traitements	0,0174	0,1491	0,86***	32
2010-2011	Tous les traitements	0,0162	1,8620	0,87***	64

synthétisé les résultats obtenus dans quatre régions des USA et a obtenu une valeur relativement constante de $1,06 \text{ kg.m}^{-3}$ et a conclu que la réponse du rendement de la luzerne à l'augmentation de l'évapotranspiration est indépendante du site. À travers une étude de cinq années, Wright (1988) a obtenu une valeur moyenne de $1,72 \text{ kg.m}^{-3}$ pour une luzerne cultivée sous des conditions non limitant en eau en Idaho (USA).

CONFRONTATION DES RENDEMENTS ET LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU EN FONCTION DE LA TECHNIQUE D'IRRIGATION

Pour comparer les performances de l'irrigation gravitaire et localisée, nous reprenons dans le tableau 8 les valeurs des rendements annuels obtenus sous le gravitaire et le goutte à goutte avec les écartements E1 et E2.

Tableau 8: Rendement annuel (t/ha) de la luzerne en fonction de la technique et le régime hydrique

Technique	Régime	2010	2011
Goutte à goutte E1 = 50 cm	T1E1	23,6	22,4
	T2E1	21,3	20,6
	T3E1	16,1	14,8
	T4E1	11,6	11,9
Goutte à goutte E2 = 75 cm	T1E2	20,0	21,0
	T2E2	16,8	16,5
	T3E2	11,9	13,1
	T4E2	8,6	9,8
Gravitaire	T1 G	23,1	24,2
	T2 G	18,3	20,1
	T3 G	17,6	16,1
	T4 G	12,9	10,9

Pour chacune des techniques d'irrigation et en considérant le rendement obtenu en appliquant T4, les améliorations des rendements sont de 95, 78 et 31% sous T1, T2 et T3 sous irrigation localisée avec l'écartement 50 cm tandis que les gains du rendement sont de 123, 81 et 36% sous les mêmes régimes avec l'écartement 75 cm. Sous irrigation gravitaire, les rendements sont améliorés de 95, 62 et 46% par rapport à celui obtenu sous le régime stressant T4. Ces valeurs indiquent l'importance des gains en rendements sous irrigation localisée avec E2.

La détermination des besoins en eau de la luzerne a été réalisée en tenant compte des deux techniques d'irrigation étudiées selon le calendrier des cycles de la culture durant les deux campagnes 2010 et 2011. Les valeurs obtenues sont récapitulés dans le tableau 9.

Les besoins sous irrigation localisée dépassent ceux en irrigation gravitaire d'environ 37 et 59 mm en 2010 et 2011 respectivement. Les pertes par évaporation, durant le stade initial, sont beaucoup plus importantes sous le goutte à goutte en raison des apports en eau fréquents. Les besoins annuels calculés pour le Tadla, sont dans l'ordre de grandeur des valeurs trouvées par d'autres chercheurs dans des climats similaires. Sous un climat semi-aride en Turkey, Benli *et al.*, (2006) ont estimé les besoins en eau de la luzerne moyennant un lysimètre à peser à 1478 et 1557 mm en 1995 et 1996 respectivement.

Tableau 9: Valeurs l'ETc (mm) de la luzerne pour les deux techniques d'irrigations (Bouazzama, 2013)

Campagne	Gravitaire	Micro irrigation
2010	1388	1425
2011	1364	1423

Les apports en eau appliqués varient de 305 mm avec l'irrigation localisée sous le régime T4E2 en 2010 à 1656 mm avec l'irrigation gravitaire sous T1 apporté en 2011 (Tableau 10). L'analyse des volumes en eau appliqués montre que l'économie nette moyenne de l'eau d'irrigation permise par l'irrigation localisée avec l'écartement 50 cm est de 24,0, 16,1, 27,3 et 17,1% pour les régimes T1, T2, T3 et T4 respectivement en comparaison au même régime sous irrigation gravitaire. Dans le cas de l'irrigation localisée avec l'écartement 75 cm, l'économie de l'eau est de 48,9, 49,8, 52,0 et 52,4% en comparaison au gravitaire pour les régimes T1, T2, T3 et T4 respectivement.

Les apports en eau effectivement réalisés sous le régime T1 avec l'écartement 50 cm sont inférieurs aux besoins nets d'environ 7% et 18% en 2010 et 2011 respectivement. L'autre partie des besoins de la culture étant satisfaite par la pluie durant la période pluvieuse. Sous le régime T1 en irrigation gravitaire, les besoins sont dépassés de 16% et 21% en 2010 et 2011 respectivement. Sous le régime hydrique 100% ETc, l'irrigation localisée avec un écartement de 50 cm entre rampes permet d'économiser environ 25% d'eau par rapport au même régime sous le gravitaire. Les excès d'eau constatés sous le gravitaire sont liés à l'efficacité hydraulique de cette technique et les pertes occasionnées par la fissuration des sols durant les mois de forte demande climatique.

Pour comparer les deux techniques d'irrigation, nous avons calculé la productivité de l'eau d'irrigation (EEI) en divisant le rendement total annuel en matière sèche sur le volume en eau réellement appliqué sans considérer les pluies et les pertes éventuelles en eau par drainage. Les résultats montrent que la productivité moyenne de l'eau d'irrigation est maximale ($2,86 \text{ kg.m}^{-3}$) sous le régime T4E2 et minimale sous le traitement T1 en irrigation gravitaire ($1,45 \text{ kg.m}^{-3}$). En général, la productivité de l'eau est meilleure sous l'irrigation localisée avec l'écartement 75 cm suivi de la même technique avec l'écartement de 50 cm. L'importance de la productivité de l'eau d'irrigation sous irrigation localisée est due surtout à l'économie d'eau plus qu'au gain du rendement en comparaison à l'irrigation gravitaire.

La représentation graphique des rendements en fonction de la productivité de l'eau (EEI) pour les différentes combinaisons de la technique d'irrigation et le régime hydrique est illustrée par la figure 7. La combinaison qui valorise mieux l'eau d'irrigation serait celle qui maximise à la fois, le rendement en biomasse et la productivité de l'eau d'irrigation. L'irrigation localisée avec l'écartement 75 cm sous le régime T1, permet d'assurer la meilleure productivité de l'eau et un rendement en biomasse égale au rendement maximal enregistré sous T1 en gravitaire. Les valeurs de ces paramètres dépassent les valeurs moyennes calculées en combinant tous les régimes.

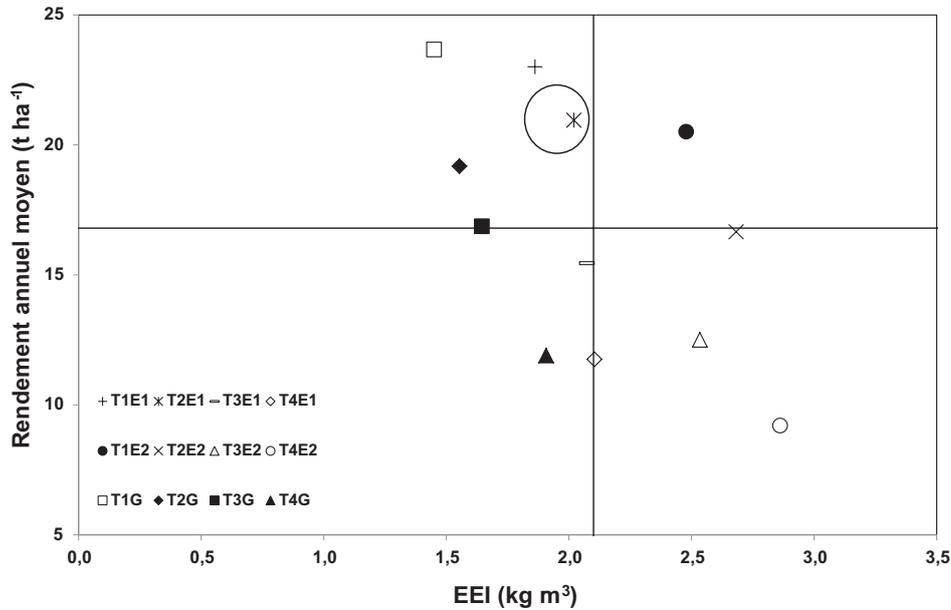


Figure 7: Combinaison régime hydrique-technique d'irrigation en fonction du rendement et la productivité de l'eau

Tableau 10: Volume appliqué, économie de l'eau et la productivité de l'eau par technique d'irrigation pour les deux campagnes 2010 et 2011

Année	Paramètre	Irrigation localisée E1 = 50 cm				Irrigation localisée E2 = 75 cm				Irrigation gravitaire			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
2010	Eau d'irrigation (mm)	1322	1110	728	532	887	665	481	305	1607	1290	994	713
	Nombre d'irrigation	54	54	54	54	54	54	54	54	13	10	7	4
	Pluie totale (mm)	386	386	386	386	386	386	386	386	386	386	386	386
	Economie de l'eau/gravitaire (%)	17,8	14,0	26,7	25,4	44,7	48,5	51,6	57,2	-	-	-	-
	Productivité de l'eau (EEI) (kg/m³)	1,79	1,92	2,21	2,18	2,25	2,23	2,47	2,82	1,44	1,42	1,77	1,81
2011	Eau d'irrigation (mm)	1156	971	764	487	776	582	505	337	1656	1188	1061	544
	Nombre d'irrigation	48	48	48	48	48	48	48	48	13	8	6	3
	Pluie totale (mm)	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405	405
	Economie de l'eau/gravitaire (%)	30,2	28,3	26,0	24,8	53,1	51,0	52,4	47,6	-	-	-	-
	Productivité de l'eau (EEI) (kg/m³)	1,94	2,12	1,94	2,03	2,70	2,84	2,59	2,91	1,46	1,69	1,52	2,01

CONCLUSION

Basée sur les résultats expérimentaux de trois ans, cette étude a montré que le régime hydrique a un effet significatif sur le rendement en biomasse et l'efficacité d'utilisation de l'eau chez la luzerne au Tadla.

Les rendements moyens en biomasse des deux années 2010 et 2011 montrent qu'une réduction de près de 60% des apports par irrigation entre 100% ETc et 40% ETc entraîne une réduction de 50% environ de la production de matière sèche. Le rendement annuel obtenu pour la luzerne conduite sans stress hydrique est presque similaire pour les deux années 2010 et 2011 avec une moyenne de 23,2 t.ha⁻¹. L'analyse de la production de la luzerne par saison, montre que la contribution des cycles de printemps au rendement total annuel varie de 55% sous 100% ETc à 65% sous 40% ETc. Les rendements de la luzerne dépendent en plus des quantités d'eau

apportées de l'emplacement des apports à l'intérieur d'un cycle.

La luzerne, malgré une exploration du sol en général profonde, peut voir sa croissance réduite en condition du déficit d'alimentation hydrique. Un déficit hydrique sévère au-delà de 40% ETc conduit à des pertes de peuplement et par conséquent des réductions permanentes en rendement. L'efficacité d'utilisation de l'eau varie d'une coupe à l'autre et d'une saison à l'autre. La valeur maximale est de 2,57 kg.m⁻³ et obtenue au printemps 2011 alors que la faible valeur est de 0,64 kg.m⁻³ et obtenue en hiver 2010. L'efficacité d'utilisation de l'eau diminue avec le stress hydrique.

L'irrigation localisée permet de réaliser des rendements similaires à l'irrigation gravitaire avec beaucoup moins d'eau et plus d'efficacité agronomique. Les apports en eau effectivement réalisés par goutte à goutte sous le

régime T1 avec l'écartement 50 cm sont inférieurs au besoin net de la culture d'environ 7% et 18% en 2010 et 2011 respectivement. Sous le régime T1 en irrigation gravitaire, les besoins sont dépassés de 16% et 21% en 2010 et 2011 respectivement. Finalement, l'irrigation localisée avec l'écartement 75 cm appliquée selon le régime 100% ETc permet d'assurer la meilleure productivité de l'eau et un rendement en biomasse proche du rendement maximal enregistré sous le même régime en gravitaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdul Jabbar A. S., Sammis T. W. and Lugg D. G. (1982). Effect of moisture level on the root pattern of alfalfa. *Irrig. Sci.* 3 :197-207
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper* n. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Badraoui M. and Stitou M. (2001). Status of soil survey and soil information systems in Morocco. *Options Médit. Ser. B*, 34, 193-204.
- Barnes, D.K., Goplen, B.P. and Baylor, J.E. (1988). Highlights in the USA and Canada. In "Alfalfa and alfalfa improvement: Agronomy Monograph 29", American Society of Agronomy.
- Bauder JW, Bauer A, Ramirez JM, Cassel DK. (1977). Alfalfa water use and production on dryland and irrigated sandy loam. *Agron. J.* 70:95-99
- Bennett O. L. and Doss B. D. (1960). Effect of soil moisture level on root distribution of cool season forage species. *Agron. J.* 52:204
- Benli, B., Kodali, S., Ilbeyi, A. and Ustun, H. (2006). Determination of evapotranspiration and basal crop coefficient of alfalfa with a weighing lysimeter. *Agri. Water Man.*, 81, 358-370.
- Bennett O. L. and Doss B. D. (1960). Effect of soil moisture level on root distribution of cool season forage species. *Agron. J.* 52:204
- Blad BL, Rosenberg NJ. (1976). Evaluation of resistance and mass transport evapotranspiration models requiring canopy temperature data. *Agron J.* 68:764-769
- Bogler TP, Matches AG. (1990). Water use efficiency and yield of sainfoin and alfalfa. *Crop Sci.* 30:143-148
- Bouazzama, B. (2013). Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau chez les principales cultures fourragères au Tadla-Maroc. Thèse de Doctorat. Université de Liège Agro-Bio-Tech de Gembloux (Belgique).
- Carter PR, Sheaffer CC. (1983). Alfalfa response to soil water deficit. I. Growth, forage quality, yield, water use, and water use efficiency. *Crop Sci.* 23:676-680
- Duru M. et Langlet A. (1989). Dynamiques de croissance et installation de la surface foliaire de repousses de dactyle et de luzerne en conditions hydriques non limitantes. *Agronomie* 9: 973-984
- Feltner K. C. and Massengale M. A. (1965). Influence of temperature and harvest management on growth, level of carbohydrates in the roots, and survival of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Crop Sci.* 5: 585-588.
- Grimes DW, Wiley PL, Sheesley WR. (1992). Alfalfa yield and plant water relations with variable irrigation. *Crop Sci.* 32: 1381-1387
- Hill RJ, Johns EL, Frevert DK. (1983). Comparison of equations used for estimating agricultural crop evapotranspiration with field research. USA Department of Interior, Bureau of Reclamation Tech Rep 08H-0808
- Krogman KK, Hobbs EH. (1965). Evapotranspiration of irrigated alfalfa as related to season and growth stage. *Can. J. Plant Sci.* 45:310-313
- Myer GL, Miller WW, Narayanan R, Jensen EH, Zheng Y-B. (1991). Water management of alfalfa through individual harvest production functions. *J. Prod. Agric.* 4:505-508
- ORMVAT, (2012). Rapport d'activité annuelles.
- Ottman M. J., Barry R. T. and Roth R. L. (1996). Alfalfa yield and stand response to irrigation termination in an arid environment. *Agron. J.* 88: 44-48
- Robison G. D. and Massengale M. A. (1968). Effect of harvest management and temperature of forage yield, root carbohydrates, plant density and leaf area relationships in alfalfa (*Medicago sativa* L. cultivar Moapa). *Crop Sci.* 8:147-151
- Saeed I. A. M. and A. H. El-Nadi. (1996). Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. *Irrig. Sci.* 17: 63-68
- Sammis TW. (1981). Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation. *Agron. J.* 73:323-329
- Sheaffer CC, Tanner CB, Kirkham MB. (1988). Alfalfa water relations and irrigation. In: Hanson AA (ed) *Alfalfa and alfalfa improvement. Agron Monogr 29*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, Wisc, pp 373-409
- Wright J.L. (1988). Daily and seasonal evapotranspiration and yield of irrigated alfalfa in southern Idaho. *Agron. J.* 80: 662-669