



Centre d'Études doctorales : Sciences et Techniques  
Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé

**T H È S E**

Présentée par :

**Abdellah Mouradi**

Pour obtenir le grade de

**Docteur**

**Spécialité : Biologie appliquée à l'environnement**

**Option : Sciences de l'eau**

**Etude des performances techniques et de l'impact agro-économique et environnemental de l'irrigation localisée couplée à l'étude de l'approche climatique basée sur la méthode de Penman Monteith dans l'irrigation de la betterave à sucre (Beta vulgaris. L) dans le Tadla.**

**Soutenue publiquement le 13/03/2021 devant le jury**

- Président** : Pr Aziz HASIB, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Examineur** : Pr Abdelkarim ARIOUA, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Examineur** : Pr Abdelmajid HADDIOUI, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Rapporteur** : Pr Abderrahim JAOUAD, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Rapporteur** : Pr Khalid HABBARI, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Rapporteur** : Pr Abderrahmene EL GHMARI, Faculté des Sciences et Techniques – Beni Mellal  
**Directeur de thèse** : Pr. Zehor AIT YACINE, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal  
**Co-Encadrant** : Pr. Abderrazak El HARTI, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

---

**Equipe Génie de l'Environnement, département science de vie, FST de Béni Mellal**

## *Avant-propos*

Le présent travail s'inscrit pleinement dans le cadre des études d'évaluation poste-projet menées par la Faculté des Sciences et Techniques de Beni Mellal (Formation Doctorale : Ressources Naturelles Santé et Environnement, Equipe Génie de l'Environnement), au niveau de la région notamment le périmètre irrigué du Tadla sous la régie de l'office régional de la mise en valeur agricole du Tadla. Il a été mené sous l'encadrement du Professeur Zehor AIT YACINE et Abderrazak EL HARTI.

Ce travail est réalisé au niveau du secteur pilote (4 045 ha) qui représente la première expérience de reconversion collective en grande hydraulique à l'échelle nationale et entre dans le cadre du Plan National de l'Economie de l'eau (PNEE) lancé en 2008.

Les résultats de la présente thèse nous ont permis de participer à plusieurs manifestations scientifiques nationales et internationales et ont donné lieu à plusieurs publications dont :

- Study of the Validity of the Climatic Approach Based on the Penman Monteith Daily Reference in the Conduct of Localized Irrigation of Sugar Beet (Beta vulgaris L.) Using Capacitive Probes of FDR Technology For The Control of The Water And Thermal Status of The Soil In The First Sectors of Collective Conversion To Localized Irrigation at The Perimeter of Beni Moussa West Tadla. Abdellah Mouradi, Zehor Ait Yacine, Abderrazak EL Harti, Mohamed Saaf, Abdelhaq Boundi.

IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS) e-ISSN: 2319-2380, p-ISSN: 2319-2372. Volume 13, Issue 9 Ser. I (September 2020), PP 06-14 [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org).

- Spatial and temporal trends of rainfall seasonality in continental climate zone of Tadla perimeters in Morocco by principal component analysis (PCA) Boundi Abdelhaq, Ait Yacine Zehor, Saaf Mohamed, Mouradi Abdellah, ELHabty Mohamed.

International Journal of Creative Research Thought. [www.ijcrt.org](http://www.ijcrt.org), 2020 IJCRT/ Volume 8, Issue 8 February 2020/ ISSN: 2320-2882

- Efficiency of usual irrigation systems and water productivity for crops in Mediterranean and semi-arid climates with reduce hydric requirements. Review A. Boundi, Z. Ait Yacine, S. Ait Lahyane, M. ELHabty, A. Mouradi, M. Saaf.

Arabian Journal of Chemical and Environmental Research Vol. 04 Issue 2 (2017) 107–126 ISSN: 2458-6544 © 2017; [www.mocedes.org](http://www.mocedes.org).

Un autre article a été publié dans le cadre d'une conférence E3S Web of conference tenue à la Faculté des Sciences et Technique de Beni Mellal du 12 au 14/12/2017.

- Study of the technical performance of localized irrigation and its environmental and agro economic impact in the first areas of collective reconversion at the irrigated perimeter of the Tadla - Beni Moussa perimeter of the west – Morocco.

Abdellah Mouradi, Zehor Ait Yacine, Abderrazak EL Harti. E3S Web of Conferences 37, 01009 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183701009> EDE6-2017

## *Dédicaces*

A la mémoire de mes feus parents que Dieu ait pitié d'eux

A mes frères et sœurs pour leurs soutiens et encouragements

A mon épouse pour tous ses sacrifices

Mes adorables enfants

A toute ma famille et mes amis

Et à tous ceux qui m'ont accompagné et soutenu,

Je vous dédie ce modeste travail

## *Remerciements*

Au terme de ces années de recherche, il est plus qu'un devoir de témoigner toute ma profonde gratitude à plusieurs personnes dont leurs soutiens et encouragements ne peuvent être évalués. Qu'il me soit permis de remercier chaleureusement ma Directrice de thèse, Madame Zehor Ait Yacine et mon co-directeur de Thèse, Abderrazak EL Harti, professeurs émérites à la FST de Beni Mellal, Université Sultane Moulay Slimane qui ont accepté de m'encadrer au regard de l'intérêt scientifique et pratique que porte mon sujet de thèse malgré leurs plans de charge. Leurs soutiens, leurs disponibilités et leurs nombreux conseils durant toute la période de thèse, m'ont été d'une grande utilité. Je suis ravi d'avoir travaillé en leur compagnie.

C'est aussi le moment d'exprimer toute ma reconnaissance aux comités d'organisation des différentes manifestations scientifiques à la FST de Beni Mellal pour m'avoir permis et facilité mes participations aux différents colloques et séminaires. Je leur suis largement redevable pour leurs directives et leurs rigueurs scientifiques.

Mes vifs remerciements vont aussi aux rapporteurs et examinateurs, pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail et à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'analyser mon travail. Qu'ils trouvent ici, mes mots de remerciements et de reconnaissance pour leur regard de chercheurs scientifiques et pour les différentes recommandations ayant conduit à l'achèvement de ce travail. Je tiens également à remercier le Directeur de l'ORMVA du Tadla et tous les fonctionnaires du département de Gestion du Réseau d'irrigation et de Drainage, du laboratoire d'analyse sol-plante-eau pour avoir mis à ma disposition les données relatives au climat et la qualité de l'eau et du sol de la zone d'étude. Je profite de cette occasion pour remercier vivement l'agriculteur Mr Mezouar Bouzekri et son fils Mr El Habib pour m'avoir permis d'installer le matériel de mesure au niveau de leur parcelle, ainsi que leur collaboration et leur compréhension pour la réussite de l'essai expérimental. Merci aussi à Mr Fiher du groupe Sucreries du Tadla pour la mise à ma disposition des résultats de la qualité technologique de la culture objet de l'étude. Toute ma reconnaissance aux personnes ressources rencontrées durant les travaux de terrain, et en particulier Mr Kamal Belabbès ex professeur à l'IAV Hassan II, et les étudiants mémorisant de l'IAV Hassan II en particulier Ammari Ouafae et Bayali Najoua, ayant déterminé au laboratoire les caractéristiques hydrodynamiques des sols de la zone d'étude, dont je désire grandement remercier.

Enfin, je remercie ma chère épouse, pour son soutien quotidien indéfectible, pour son sacrifice durant mes absences et pour son enthousiasme à voir l'achèvement de cette thèse.

Merci d'être endurante avec mes adorables enfants, pour qui cette thèse doit être un socle de l'espérance et du dévouement.

Que tous ceux qui ont pu me consacrer quelques minutes de leur temps à me faire des suggestions pertinentes pour m'avoir conduit à ce jour mémorable acceptent mes remerciements.

Que ceci puisse être le témoignage de ma plus haute reconnaissance et mon ample gratitude.

## *Liste des acronymes et abréviations*

<b>AUEA</b>	: Associations d'Usagers d'Eau d'Irrigation
<b>CDA</b>	: Centre de Développement Agricole
<b>CHfm</b>	: Charges liées à la fourniture et le matériel
<b>CIID</b>	: Commission Internationale de l'Irrigation et du Drainage
<b>CU</b>	: Coefficients d'Uniformité
<b>CWSI</b>	: Crop water Stress Index
<b>D</b>	: Drainage
<b>EC</b>	: Conductivité Electrique
<b>EC<sub>e</sub></b>	: Conductivité du sol (extrait de la pâte saturée)
<b>EC<sub>w</sub></b>	: Conductivité de l'eau,
<b>Ea</b>	: Efficience d'application de l'Eau d'Irrigation
<b>Eg</b>	: Efficience globale de l'Eau d'Irrigation
<b>EUE</b>	: Efficience d'Utilisation de l'Eau
<b>ESP</b>	: Taux de Sodium Echangeable
<b>ET°</b>	: Evapotranspiration de références
<b>ETc</b>	: Evapotranspiration de culture
<b>ETM</b>	: Evapotranspiration Maximale
<b>ETP</b>	: Evapotranspiration Potentielle
<b>ETR</b>	: Evapotranspiration Réelle
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organisation
<b>FDR</b>	: Frequency Domain Reflectometry
<b>GIS</b>	: Système Information Géographique
<b>I</b>	: Irrigation
<b>Kc</b>	: Coefficient cultural
<b>Kr</b>	: Coefficient de réduction
<b>LR</b>	: Leaching Requirement
<b>MB</b>	: Marge Brute
<b>MES</b>	: Matière En Suspension
<b>NJT</b>	: Nombre de Journées de Travail
<b>ONE</b>	: Office National de l'électricité
<b>ORMVAT</b>	: Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla
<b>PNEEI</b>	: Programme National de l'Economie de l'Eau d'Irrigation

<b>P</b>	: Pluie
<b>PB</b>	: Produit Brute
<b>Pb</b>	: Prise borne
<b>PP</b>	: Prise Propriété
<b>Pdc</b>	: Pertes de charge requises
<b>Pe</b>	: Pluie efficace
<b>P<sub>f</sub></b>	: Pression de fonctionnement
<b>PH</b>	: Potentiel Hydrogène
<b>PN</b>	: Pression Nominale
<b>PU</b>	: Prix Unitaire
<b>PVC</b>	: Chlorure de Polyvinyle
<b>RC</b>	: Remontées Capillaires
<b>RSC</b>	: Carbonate de Sodium Résiduel
<b>SAR</b>	: Rate Sodium Adsorption
<b>SI</b>	: Systèmes d'Irrigation
<b>SONACOS</b>	: Société Nationale de Commercialisation des Semences
<b>TDS</b>	: Quantité Totale de matière Dissoute
<b>TIC</b>	: Taux d'Intensification Culturelle
<b>SWD</b>	: Réserve stockable dans la zone racinaire au moment de l'irrigation
<b>VA</b>	: Valeur Ajoutée



## Liste des tableaux

Tableau 1 : Efficience au champ des systèmes d'irrigation.....	10
Tableau 2 : Classification de l'eau en fonction de la salinité.....	14
Tableau 3 : Risque des bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) pour l'eau d'irrigation.....	20
Tableau 4 : Classes d'uniformité de distribution.....	25
Tableau 5 : Seuils de tolérance de la betterave à sucre à la salinité.....	42
Tableau 6 : Valeurs de Kr en fonction du taux de couverture Cs.....	54
Tableau 7 : Normes d'interprétation des C.U.....	58
Tableau 8 : Diamètre des conduites PVC.....	62
Tableau 9 : Bilan ionique de l'eau d'irrigation du Barrage Bin El Ouidane.....	65
Tableau 10 : Paramètres de qualité de l'eau du barrage.....	66
Tableau 11 : Conductivité électrique et % Na de l'eau du barrage .....	68
Tableau 12 : Conductivité électrique et SAR de l'eau du barrage.....	70
Tableau 13 : Variation de la pluviométrie horaire réelle par poste d'arrosage.....	71
Tableau 14 : Variation entre la pluviométrie moyenne horaire réelle et Celle théorique.....	72
Tableau 15 : Variation entre le débit moyen de fonctionnement et le débit Moyen du Projet des exploitations étudiées.....	74
Tableau 16 : variation des débits moyens.....	81
Tableau 17 : Perméabilité des horizons superficiels du sol de la zone d'étude.....	82
Tableau 18 : Caractéristiques hydrodynamiques du sol de la zone d'étude.....	83
Tableau 19 : Calcul de la Reserve Utile par horizon du sol.....	83
Tableau 20 : Granulométrie des sols de la zone d'étude.....	84
Tableau 21 : Détermination des différentes efficiences d'utilisation de l'eau D'irrigation.....	85
Tableau 22 : Engrais utilisés et seuil de solubilité.....	87
Tableau 23 : Doses moyennes d'engrais apportées.....	87
Tableau 24 : Résultats d'évaluation des principaux paramètres de Performance de la fertigation.....	88
Tableau 25 : Tolérances des cultures à la salinité.....	89
Tableau 26 : Calcul du temps de rinçage nécessaire par secteurs d'irrigation.....	90
Tableau 27 : Variation de la pression moyenne au niveau des émetteurs.....	93
Tableau 28 : Variation de la pression moyenne en tête de parcelle et au	

Niveau du filtre.....	93
Tableau 29 : Indicateurs agro-économiques par classe d'exploitation agricole.....	88
Tableau 30 : Etat comparatif de la consommation moyenne à l'hectare de La situation d'avant et après le projet.....	98
Tableau 31 : Utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines.....	99
Tableau 32 : Evolution de la qualité des eaux de la nappe entre 2014 et 2016.....	103
Tableau 33 : Evolution des occupations de sol.....	106
Tableau 34 : Evolution de la part de chaque culture dans le Taux de L'intensification Culturelle globale.....	108
Tableau 35 : Part des cultures dans l'assolement global.....	109
Tableau 36 : Scores des principaux indicateurs agro-économiques Entre 2016 Et la situation de référence 2013.....	112
Tableau 37 : Effet de la transition à l'irrigation localisée sur les indices Agro-économiques .....	113
Tableau 38 : Bilan généré par la reconversion collective.....	118
Tableau 39 : Teneur en eau des horizons du sol correspondant Aux humidités caractéristiques du sol.....	124
Tableau 40 : Etat comparatif des rendements quantitatifs et qualitatifs De la betterave à sucre.....	133
Tableau 41 : Etat comparatif de l'allocation de l'eau et sa valorisation Par la betterave à sucre.....	134
Tableau 42 : Etat comparatif des indices agro-économiques de la betterave À sucre.....	135

## Liste des figures

Figure 1 : Diagramme de Richard (Degré imperméabilisation du sol).....	17
Figure 2 : Diagramme de Richard (pouvoir d'alcalinisation).....	18
Figure 3 : Appreciation des eaux de la nappe de Meskina selon le diagramme wilcox.....	19
Figure 4 : Localisation géographique du périmètre irrigué du Tadla.....	46
Figure 5 : Localisation des AUEA de la zone de reconversion collective.....	47
Figure 6 : Premiers secteurs de la zone pilote de reconversion collective.....	48
Figure 7 : Plan de situation des exploitations étudiées.....	51
Figure 8 : Typologie des exploitations étudiées.....	52
Figure 9 : Typologie du niveau d'instruction des exploitants.....	53
Figure 10: Manomètre de mesure de pression.....	56
Figure 11: Emplacement des points de mesure.....	58
Figure 12 : Diagramme de wilcox modifié (1948) de l'eau du barrage.....	59
Figure 13 : Diagramme de Richard de l'eau du barrage.....	70
Figure 14 : Variation de la pluviométrie réelle horaire des postes d'arrosage.....	72
Figure 15 : Variation entre le débit moyen réel et celui du projet des exploitations .....	73
Figure 16 : Corrélation entre le débit réel et celui du projet des parcelles étudiées.....	74
Figure 17 : variations de la pluviométrie et l'ET° au cours de l'année agricole.....	75
Figure 18 : Besoins en eau des cultures des principales spéculations pratiquées.....	76
Figure 19 : Besoins en eau d'irrigation des cultures pratiquées.....	77
Figure 20 : Comparaison entre les quantités réellement apportées par les Usagers agricoles et les besoins bruts d'irrigation théoriques.....	78
Figure 21 : Satisfaction des besoins en eau des cultures par les irrigations.....	79
Figure 22 : Variation de l'uniformité d'arrosage des exploitations étudiées.....	80
Figure 23 : Efficiences moyennes globales des différentes exploitations.....	86
Figure 24 : Comparaison entre le temps de rinçage requis et celui fictif.....	91
Figure 25 : Utilisation des eaux de surface.....	98
Figure 26 : Variation de l'utilisation conjuguée des eaux de surface souterraines Entre la situation de référence 2014 et celle d'après le projet 2016.....	99
Figure 27 : Etat comparatif de la conductivité électrique du sol par horizon Entre La Situation de référence et celle d'après le projet.....	101
Figure 28 : Fluctuation de CE du sol avant et après-projet .....	102
Figure 29 : Part des cultures dans l'intensification culturelle.....	109

Figure 30 : Variation du Taux d'Intensification Cultural entre les exploitations.....	110
Figure 31 : Part du poste de main d'œuvre dans le coût de revient.....	111
Figure 32 : Variation des rendements des cultures entre la situation de Référence et celle d'après le projet.....	114
Figure 33 : Variation du produit brut des cultures entre la situation de Référence et celle d'après le projet.....	115
Figure 34 : Variation de la marge brute des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet. ....	115
Figure 35 : Variation de la valeur ajoutée des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet .....	116
Figure 36 : Variation de la valorisation de l'eau par les cultures entre la Situation de référence et celle d'après le projet.....	117
Figure 37 : Schémas du dispositif expérimental.....	124
Figure 38 : Variation de l'humidité du sol en profondeur au cours du cycle De la betterave A sucre.....	125
Figure 39 : Evolution du stock d'eau du sol sur l'horizon 0-60 cm.....	127
Figure 40 : Variation du stock d'eau du sol mesuré au cours du cycle cultural De la betterave à sucre.....	127
Figure 41 : Corrélation entre l'Evapotranspiration Réelle et celle Maximale.....	129
Figure 42 : Evolution de l'Evapotranspiration Réelle et celle Maximale.....	130
Figure 43 : Variation de la température du sol en profondeur.....	132

## Resumé

La présente investigation réalisée au niveau des premiers secteurs de la reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla, se veut d'étudier les performances techniques du système d'irrigation localisée et son impact environnemental et agro-économique couplée à un travail expérimental sur le pilotage de l'irrigation basée sur une approche climatique. Pour ce faire, un échantillon d'exploitations choisis de manière à refléter la diversité de la zone a été retenu pour évaluer les principaux paramètres de la performance techniques du nouveau système d'irrigation introduit dans la zone. Les résultats de la performance hydraulique du nouveau système d'irrigation révèlent l'absence d'anomalies apparentes de dysfonctionnement des installations (Coefficient d'Uniformité de distribution  $\geq 90\%$  avec des efficacités moyennes d'application et globale de 90.54 et 86.83% respectivement). En termes de consommation en eau d'irrigation, on note un renoncement à l'usage des eaux souterraines et une augmentation de l'utilisation des eaux de surface qui sont de bonne qualité et de moindre coût. L'usage conjuguée des eaux de surface et souterraines, procure toutefois, une économie de 29.55 % par rapport à l'ancien système d'irrigation gravitaire. L'étude agro-économique a mis en exergue la forte valeur ajoutée et la meilleure valorisation du m<sup>3</sup> d'eau utilisé. A l'échelle de la première tranche d'équipement interne (10.235 ha), la reconversion à l'irrigation localisée a généré une valeur ajoutée additionnelle par rapport à la situation de référence de près de 100 MDH, soit + 9804 DH/ha (+33%).

L'impact environnemental s'est traduit par un rabattement moyen de la nappe de 2.59 m dû à la limitation de la percolation de l'eau d'irrigation vers la nappe, une augmentation de la salinité par rapport à la situation de référence (+ 0.50 %, soit 0.01 mS/cm) et une diminution de 20 % du niveau des nitrates dans les eaux de nappe. L'effet des sels solubles sur la perméabilité et la dispersion des sols, abordé à travers les risques liés au sodium (SAR) et au carbonate de sodium résiduel est à écarter pour le moment.

Les résultats inhérents à la partie expérimentation montrent que l'approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith est tout à fait valable dans le contexte du Tadla pour prédire les besoins en eau et planifier les arrosages de la betterave à sucre. Le mode de pilotage testé a créé à la culture les conditions d'alimentation hydriques favorables en les maintenant durant tout le cycle de croissance entre les humidités caractéristiques du sol, Hcc : 249 mm (Humidité à la capacité au champ) et HpF : 138 mm (Humidité au point de flétrissement), lui permettant d'exprimer pleinement son potentiel de production. L'approche climatique peut à cet effet, être un outil efficace pour une gestion optimale des irrigations évitant tous les risques de

gaspillage et de pollution diffuse. En matière d'instrumentation, les sondes capacitives de technologie FDR semblent être des outils efficaces pour surveiller l'humidité et fournir des références sur l'utilisation de l'eau du sol. Il convient donc d'assortir l'appui au développement de l'irrigation localisée d'un accompagnement rapproché des usagers agricoles pour une conduite opportune et économe, réduite au strict besoin en eau de la culture assurant une utilisation sobre des facteurs de production à même de se parer des problèmes environnementaux.

**Mots clés** : Reconversion collective, irrigation localisée, Impact environnemental, Performances techniques, pilotage irrigation, Penman Monteith, Périmètre Tadla.

## *Abstract*

The present investigation carried out at the level of the first sectors of collective conversion to localized irrigation in the irrigated perimeter of Tadla, aims to study the technical performance of the localized irrigation system and its environmental and agro-economic impact coupled with experimentation on the irrigation management based on a climate approach. To do this, a sample of farms chosen to reflect the diversity of the area was used to assess the main parameters of the technical performance of the new irrigation system introduced in the area. The results of the hydraulic performance of the new irrigation system reveal the absence of apparent anomalies in the dysfunction of the installations (Coefficient of Uniformity of distribution  $\geq 90\%$  with average application and overall efficiencies of 90.54 and 86.83% respectively). In terms of irrigation water consumption, there is a renouncement of the use of groundwater and an increase in the use of good quality surface water at lower cost. The combined use of surface and groundwater, however, provides a saving of 29.55% compared to the old gravity irrigation system. The agro-economic study highlighted the high added value and the best valuation of the m<sup>3</sup> of water used. At the level of the first tranche of internal equipment (10.235 ha), the conversion to localized irrigation generated additional added value compared to the reference situation of nearly 100 MDH, i.e. + 9 804 DH / ha (+ 33%).

The environmental impact was reflected by an average drawdown of the aquifer of 2.59 m (due to the limitation of the percolation of irrigation water towards the aquifer), an increase in salinity compared to the reference situation (+ 0.50%, i.e. 0.01 mS / cm) and a 20% reduction in the level of nitrates in groundwater. The effect of soluble salts on the permeability and dispersion of soils, approached through the risks linked to sodium (SAR) and residual sodium carbonate is to be ruled out for the moment. The results of the experiment show that the climatic approach based on the Penman Monteith daily benchmark is entirely valid in the context of Tadla for predicting water needs and planning watering of sugar beet. The piloting method tested created favorable water supply conditions for the crop by maintaining them throughout the growth cycle between the characteristic humidity of the soil, Hcc: 249 mm (Moisture at field capacity) and HpF: 138 mm (Moisture at wilting point), allowing it to fully express its production potential. To this end, the climate approach can be an effective tool for optimal management of irrigation, avoiding all the risks of waste and diffuse pollution. In terms of instrumentation, FDR technology Aqua check capacitive sensors seem to be effective tools for monitoring humidity and providing references on the use of soil water. Support for the

development of localized irrigation should therefore be combined with close support for agricultural users for timely and economical management, reduced to the strict water requirements of the crop ensuring a sober use of production factors and to deal with environmental problems.

Keywords: Collective conversion, localized irrigation, Environmental impact, Technical performance, irrigation management, Penman Monteith, Tadla perimeter.



## ملخص

يهدف البحث الحالي الذي تم إجراؤه على مستوى القطاعات الأولى للتحويل الجماعي إلى الري الموضعي في المنطقة المسقية لتادلة، إلى دراسة الأداء الفني لنظام الري المحلي وتأثيره البيئي والاقتصادي الزراعي إلى جانب التجريب في إدارة الري على أساس نهج المناخ. للقيام بذلك، تم استخدام عينة من المزارع التي تم اختيارها لتعكس تنوع المنطقة لتقييم المعايير الرئيسية للأداء الفني لنظام الري الجديد الذي تم إدخاله في المنطقة. نتائج الأداء الهيدروليكي لنظام الري الجديد تكشف عدم وجود تشوهات واضحة في الخلل في التركيبات (معامل التوحيد للتوزيع  $\leq 90\%$  بمتوسط التطبيق والكفاءات الإجمالية 90.54 و 86.83% على التوالي). فيما يتعلق باستهلاك مياه الري، هناك تنازل عن استخدام المياه الجوفية وزيادة في استخدام المياه السطحية ذات النوعية الجيدة بتكلفة أقل. ومع ذلك، فإن الاستخدام المشترك للمياه السطحية والجوفية يوفر 29.55% مقارنة بنظام الري بالجاذبية القديمة. وسلطت الدراسة الزراعية الاقتصادية الضوء على القيمة المضافة العالية وأفضل تقييم لمتر مكعب المياه المستخدمة. على مقياس الشريحة الأولى من التجهيز الداخلي (10،235 هكتار)، وُلد التحويل إلى الري الموضعي قيمة مضافة إضافية مقارنة بالوضع المرجعي لما يقرب من 100 مليون درهم، أي +9804 (33%+) درهم / هكتار

انعكس التأثير البيئي على انخفاض متوسط طبقة المياه الجوفية بمقدار 2.59 م (بسبب محدودية ترشيح مياه الري نحو الخزان الجوفي)، وزيادة الملوحة مقارنة بالحالة المرجعية (+0.50%)، أي 0.01 mS / cm وانخفاض بنسبة 20% في مستوى النترات في المياه الجوفية. سيتم في الوقت الحالي استبعاد تأثير الأملاح القابلة للذوبان على نفاذية التربة وتشتتها، والتي تمت معالجتها من خلال المخاطر المرتبطة بالصوديوم (SAR) و كربونات الصوديوم المتبقية. تظهر نتائج التجربة أن النهج المناخي القائم على المعيار اليومي Penman Monteith صالح تمامًا في سياق Tadla للتنبؤ بالاحتياجات المائية والتخطيط لسقي الشمندر السكري. وقد خلقت طريقة التجريب التي تم اختبارها ظروفًا مواتية لإمدادات المياه للمحصول من خلال الحفاظ عليها طوال دورة النمو بين الرطوبة المميزة للتربة، Hcc: 249 mm و HpF: 138 mm، مما يسمح لها بالتعبير تمامًا عن إمكانات الإنتاج. تحقيقًا لهذه الغاية، يمكن أن يكون نهج المناخ أداة فعالة للإدارة المثلى للري، وتجنب جميع مخاطر النفايات وانتشار التلوث. فيما يخص الأجهزة، يبدو أن مجسات تكنولوجيا FDR السعوية هي أدوات فعالة لرصد الرطوبة وتوفير معايير حول استخدام مياه التربة. لذلك، يجب أن يقترن دعم تطوير الري الموضعي مع الدعم الوثيق للمستخدمين الزراعيين من أجل الإدارة الاقتصادية في الوقت المناسب، وتقليله إلى متطلبات المياه الصارمة للمحصول مما يضمن الاستخدام السليم لعوامل الإنتاج وللتعامل مع المشاكل البيئية.

الكلمات المفتاحية: التحويل الجماعي، الري الموضعي، الأثر البيئي، الأداء الفني، إدارة الري، بنمان مونتيت، منطقة تادلة.

## Sommaire

- Avant-propos	
- Dédicaces	
- Remerciements	
- Liste des acronymes et abréviations	
- Liste des tableaux	
- Liste des figures	
- Résumé	
- Abstract	
- ملخص	
- INTRODUCTION GENERALE.....	1
- <b>CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>4</b>
I- Différentes techniques d'irrigation.....	4
II- Efficacités des systèmes d'irrigation.....	9
III- Terminologie de l'Evapotranspiration.....	11
IV- Statut hydrique du sol.....	12
V- Notion d'analyse diagnostic des systèmes d'irrigation localisée.....	12
V-1 Appréciation de la qualité de l'eau d'irrigation et du sol.....	13
V-1-1 Qualité chimique de l'eau.....	13
V-1-1-1 Risque de salinité.....	14
V-1-1-2 Risques liés au sodium.....	15
V-1-1-2-1 Diagramme de Richard (Riverside).....	17
V-1-1-2-2 Diagramme de wilcox modifié.....	18
V-1-1-3 Carbonate de sodium résiduel .....	19
V-1-1-4 Eléments toxiques de l'eau d'irrigation.....	20
V-1-1-5 PH de l'eau.....	21
V-1-1-6 Dynamique des sels dans le profil du sol.....	21
V-2 Diagnostic hydraulique et concept de la performance hydraulique.....	22
V-2 -1 Cadre théorique d'analyse et d'évaluation des performances des SI.....	22
V-2-2 Contrôle de la pression de fonctionnement.....	23
V-2-3 Indicateurs d'uniformité de distribution de l'eau.....	24
V-2-3-1 Le coefficient d'Uniformité.....	24
V-2-4 Efficacité d'un système.....	26
V-2-4-1 Définition et concept d'efficacité.....	26

V-2- 4-2	Efficience productive.....	27
V-2-4-3	Efficience allocative.....	27
V-2- 4-4	Efficience des systèmes d'irrigation.....	27
V-2-4-4-1	Indicateurs d'efficience.....	27
V-2-4-4-2	Efficience de transport.....	27
V-2-4-4-3	Efficience du réseau de distribution d'eau.....	27
V-2-4-4-3-1	Efficience d'application de l'irrigation.....	28
V-2-4-4-3-2	Efficience globale.....	28
VI-3	Diagnostic de la performance agronomique.....	29
VI-3 -1	Le rendement.....	29
VI-3-2	Notion d'efficences d'utilisation et de productivité de l'eau.....	29
VI-3-2-1	Efficences d'utilisation de l'eau.....	29
VI-3-3	Notion de satisfaction des besoins en eau des cultures.....	30
VI-4	Concept de performance agro-économique .....	31
VI-4-1	le Produit Brut par hectare.....	31
VI-4-2	La Valeur Ajoutée par hectare .....	31
VI-4- 3	Marge brute .....	31
VI-4-4	La valorisation du m <sup>3</sup> d'eau d'irrigation.....	32
VI-4- 5	Ratio coût-bénéfice.....	32
VII-	le pilotage et la gestion de l'irrigation.....	33
VII-1	Introduction.....	33
VII-2	Calcul des besoins en eau.....	33
VII-3	Les techniques de pilotage d'irrigation.....	35
VII-3-1	Pilotage basé sur le bilan hydrique.....	35
VII-3-2	Pilotage fondé sur le contrôle du statut hydrique .....	36
VII-3-3	Méthodes fondées sur les prélèvements d'échantillons.....	37
VII-3-3-1	Mesures dans le sol en place.....	37
VII-3-3-2	Pilotage basé sur le climat.....	38
IIX-	Changements engendrés par le système de reconversion collective.....	39
IIX-1	Les rendements.....	39
IIX-2	L'économie de l'eau d'irrigation.....	39
IIX-3	Utilisation des eaux souterraines.....	40
IIX-4	Assolements et intensification culturales.....	40
IX-	Fiche technique de la betterave à sucre.....	41

<b>- CHAPITRE 2 : Etude des performances de l'irrigation localisée</b> .....	45
I- Etude des performances de l'irrigation localisée.....	46
I- 1 Présentation de la zone d'étude.....	46
II- Objectifs de l'étude.....	51
III- Matériels et approches méthodologiques.....	48
IV- Résultats et discussions.....	65
IV-1 Diagnostic hydraulique du système d'irrigation.....	65
IV-1-1 Qualité de l'eau d'irrigation de surface.....	65
IV-1-1-1 Indice de perméabilité.....	67
IV-1-1-2 Diagramme de wilcox modifié.....	68
IV-1-1-3 Diagramme de Richard.....	69
IV-1-2 Contrôle du débit de l'installation.....	71
IV-1-3 Gestion des arrosages.....	74
IV-1-3-1 Evapotranspiration de référence .....	75
IV-1-3-2 Besoins en eau des cultures.....	76
IV-1-3-2-1 Besoins nets et bruts des cultures.....	76
IV-1-3-2-2 Volumes d'eau d'irrigation fictifs apportés.....	77
IV-1-3-3- Satisfaction des besoins en eau.....	78
IV-1-4 Uniformité de la distribution de l'eau d'irrigation.....	79
IV-1-4-1- Coefficient d'uniformité.....	79
IV-1-4-2- Qualification de l'uniformité de la distribution.....	80
IV-1-5 Efficience du système d'irrigation.....	81
IV-1-6 Diagnostic de la pratique de l'irrigation fertilisante.....	86
IV-1-6-1- Engrais utilisés et seuil de solubilité.....	86
IV-1-6-2- Etat initial de la fertilité du sol.....	87
IV-1-6-3- Adoption de la pratique de chimigation.....	88
IV-1-6-4- Contrôle des paramètres de l'injection.....	88
IV-1-6-5 - Rinçage du réseau.....	89
IV-1-6-6 – Contrôle du pH de la solution fille.....	91
IV-1-7 Contrôle des pressions.....	92
IV-1-8 Maintenance et entretien du matériel d'irrigation.....;	94
IV- Performances agro-économiques.....	94
IV-1- Analyse à l'échelle de l'exploitation .....	95
IV-2- Analyse à l'échelle de la culture.....	96

V- Changements engendrés par la reconversion.....	96
V- 1 Effet de la transition sur la Consommation en eau d'irrigation.....	97
V- 1-1 Economie de l'eau d'irrigation.....	97
V- 1-2- Volumes d'eau facturés.....	97
V- 1-3- Utilisation conjuguée des eaux .....	99
V- 1-4- Utilisation des eaux souterraines.....	100
V- 2 Effets sur les paramètres environnementaux.....	100
V- 2 - 1 Salinité du sol.....	101
V- 2 -2 PH du sol.....	102
V- 2 – 3 Qualité des eaux souterraines.....	102
V- 2 - 4 La salinité de l'eau.....	102
V- 2 - 5 Les risques liés au sodium.....	104
V- 2 - 6 Carbonate de sodium résiduel.....	105
V- 2 - 7 Le pH de l'eau.....	105
V- 2 - 8 Profondeur de la nappe.....	105
V- 3 Impacts sur les systèmes de culture pratiqués.....	106
V- 3-1 Emblavements culturaux.....	106
V- 3-2 Intensification culturale.....	107
V- 4 Main d'œuvre.....	110
V- 5 Commercialisation des productions.....	111
V- 6 Effets sur les Indicateurs agro-économiques.....	112
V- 6 – 1 Le rendement.....	113
V- 6 - 2 Le Produit Brut.....	114
V- 6 - 3 La Marge Brute.....	115
V- 6 - 4 La Valeur Ajoutée.....	116
V- 6- 5 La Valorisation de l'eau d'irrigation.....	116
<b>VI- Retombées économiques de la reconversion collective à l'irrigation</b>	
Localisée à l'échelle de la zone pilote.....	117
<b>- CHAPITRE 3 : Expérimentation sur le pilotage de l'irrigation.....</b>	<b>121</b>
I - Justification de l'étude.....	121
II - Approche du travail.....	122
III - Résultats et discussions.....	124
III- 1 Contrôle du statut hydrique du sol.....	124
III- 1-1 Variation de la teneur en eau du sol.....	124

III- 1- 2 Calcul du stock d'eau dans le sol.....	125
III- 1- 3 Variation du stock d'eau journalier.....	127
III- 1- 4 Comparaison entre ETM et ETR.....	128
III- 1- 4-1 Base de calcul.....	128
III- 1- 4- 2 Corrélation entre ETM et ETR.....	129
III- 1- 4- 3 Evolution du cumul de l'ETR et de l'ETM.....	129
III- 1- 5 Calcul de l'indice de stress hydrique .....	131
III - 2 Contrôle du régime thermique du sol.....	131
IV - Performances agro-économiques de la culture.....	133
IV- 1 Paramètres quantitatifs et qualitatifs.....	133
IV- 2 Economie et valorisation de l'eau d'irrigation.....	134
IV- 3 - Rentabilité de la culture.....	134
V- Conclusion de la partie expérimentation.....	135
<b>- CHAPITRE 4 : Conclusion générale, recommandations pratiques et perspectives</b>	
<b>D'avenir</b> .....	137
- Références bibliographiques.....	147
- Références webographiques.....	157
- Annexes.....	158

***INTRODUCTION***

***GENERALE***

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Dans les environnements arides et semi-arides représentant plus de 40% des terres du monde entier, (Gamo, (1999)), l'eau est le facteur qui limite la production agricole (Cattiveli et al. (2008)). Le secteur agricole (mobilisant plus de 80% des ressources en eau, Belghiti (2012)) est appelé dans le contexte de la raréfaction de l'eau à utiliser à bon escient l'eau d'irrigation à travers une meilleure valorisation technique, économique et sociale de cette ressource, et surtout à la préserver pour les générations futures (Moghli, E. et Benjelloun, T., (2000)). Le secteur irrigué est donc appelé à améliorer sa productivité et donc son efficacité, avec la même quantité d'eau disponible, sinon avec moins, et ce tout en préservant le patrimoine productif (milieu et l'eau d'irrigation en tant que principal facteur de production). De ce fait, un grand nombre de technologies agricoles ont été disséminées pour améliorer la productivité des exploitations agricoles, cependant une inefficacité de l'utilisation des facteurs de production ne permet pas d'atteindre les objectifs escomptés. Ainsi, le changement technologique ne peut pas à lui seul expliquer les variations de la production car il faut tenir compte aussi de la notion d'efficience (compétences techniques et économiques de l'agriculteur et le changement de l'environnement socio-économique et institutionnel (Harbouz R. et al., (2009)). Ainsi, l'organisation des usagers agricoles autour de projets collectifs d'irrigation visant la reconversion à l'irrigation localisée, représente une solution prometteuse pour faire face à cette nouvelle situation (Dionnet M. et al., (2006)). C'est dans cette optique que le Programme National de l'Economie de l'Eau d'Irrigation (PNEEI) initié en 2008, s'est fixé à l'échelle nationale d'équiper à l'horizon 2020 plus de 550 000 ha en système d'irrigation à économie d'eau. Des quotas d'équipement ont été octroyés aux différentes régions du Royaume selon les potentialités offertes par région. Le périmètre du Tadla à lui seul s'est accaparé de plus de 88 740 ha (22% du programme national) dont 49 040 ha pour la reconversion collective et 39700 ha pour la reconversion individuelle. Dans le sillage de ces processus de reconversion, Vidal et al. (2001), cité par Dionnet M. et al., (2006) ont précisé que si les conditions de mise en œuvre de telles techniques ne sont pas réunies, notamment en termes d'accompagnement des nouveaux utilisateurs, les reconversions en irrigation localisée peuvent aboutir à des performances agronomiques décevantes. L'évaluation post-projet des performances techniques des installations constitue à cet effet, un outil permettant de déceler si les pratiques des usagers agricoles vont dans le sens des bonnes pratiques à savoir l'intensification écologique, utilisation sobres des ressources et l'augmentation de la productivité et la valeur ajoutée. Fusillier et Saque (2001) cité par Petit



guyot T. et al., (2005) rapportent ainsi des situations dans lesquelles la consommation en eau à l'hectare a augmenté avec des techniques d'irrigation localisée, en raison d'une mauvaise maîtrise technique.

Le présent travail scindé en deux parties vise d'une part une évaluation des performances du réseau d'irrigation localisée mis en place à travers l'appréciation des principaux indicateurs hydrauliques et agro-économiques et l'impact environnemental et agro-économique du projet, d'autre part à mener une expérimentation au champs sur un aspect lié à la gestion de l'eau d'irrigation et constituant un maillon faible de la chaîne de production chez la plupart des usagers agricoles de la zone d'étude. Le volet pratique de cette partie réside dans la réalisation d'enquêtes et des mesures sur le terrain auprès de 32 exploitations représentatives du secteur pilote et reflétant la diversité du milieu.

Ce document est organisé en quatre chapitres en l'occurrence :

- Une partie bibliographique ayant pour objectif de replacer l'étude dans son contexte disciplinaire et de capitaliser les références techniques déjà acquis. Dans cette partie nous avons décliné entre autres les concepts et les indicateurs de performance hydraulique, agro-économique et environnementale. Le pilotage de l'irrigation sur la base des méthodes climatiques empiriques a été aussi abordé.

- Une étude diagnostic visant l'évaluation de la pratique de l'irrigation par les agriculteurs dans un secteur nouvellement reconverti à l'irrigation localisée. Au-delà de la dimension agro-économique de cette évaluation, l'aspect environnemental est aussi pris en considération afin de cerner l'impact et les changements engendrés par cette transition.

- Un volet expérimental au champ touchant un aspect technique faisant défaut chez la plupart des usagers agricoles de la zone objet du diagnostic agronomique.

- Une conclusion générale et les recommandations pratiques susceptibles d'améliorer la régie des irrigations dans la zone de la reconversion collective à l'irrigation localisée au niveau du périmètre irrigué du Tadla.

***REVUE***

***BIBLIOGRAPHIQUE***

# **CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

Cette étude bibliographique a pour objectif de replacer l'étude dans son contexte disciplinaire et de capitaliser les références techniques déjà acquis en matière d'étude diagnostic de la pratique de l'irrigation localisée. Cette investigation permettra en outre de Justifier une approche nous permettant une analyse plus pertinente de notre problématique et d'identifier les indicateurs et facteurs les plus saillants de la performance effective du système d'irrigation localisée et de son impact environnemental et agro- économique. Partant de ces éléments, toutes les situations où l'on constate de mauvaises performances aussi bien environnementales qu'agronomiques et hydrauliques peuvent en conséquence être expliquées et corrigées. Les principaux aspects relatés au niveau de cette partie auront trait essentiellement à :

- les terminologies et les acquis scientifiques en matière d'irrigation localisée,
- Les différentes techniques d'irrigation,
- le cadre théorique d'analyse et d'évaluation des performances des systèmes irrigués,
- Les différents diagnostic et concepts de la performance (hydraulique, agro-économique).
- L'acquisition des références techniques sur le pilotage de la betterave à sucre basé sur l'approche climatique.
- Déceler les changements engendrés par la transition à l'irrigation localisée,
- Phytotechnie et pilotage de l'irrigation de la betterave à sucre.

## **I - Les différentes techniques d'irrigation**

### **I-1 Terminologie de l'irrigation**

L'irrigation est une opération qui consiste à amener de l'eau supplémentaire à des cultures en cas de manque ou d'insuffisance d'eau d'origine naturelle; dans des régions arides ou à climat très sec ([https:// www. Senagriculture . com / article/coup-d'oeil-différentes](https://www.Senagriculture.com/article/coup-d'oeil-différentes)).

Les techniques d'irrigation agricole sont classifiées en irrigation de surface, irrigation par aspersion et micro irrigation. Cependant, le succès d'une technique d'irrigation sera très dépendant du site, de facteurs de situation ainsi que du niveau de gestion utilisé ([https:// irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole](https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole)).

### **I-2 Techniques d'irrigation gravitaire**

C'est la technique la plus ancienne utilisant un canal à ciel ouvert, apportant de l'eau par gravité sur des canaux de plus en plus petits pour irriguer les parcelles cultivées. Ce système présente un grand inconvénient car il utilise énormément d'eau, d'autant plus qu'une grande

partie se perd par évaporation (<https://arrosage.ooreka.fr/comprendre/irrigation>). L'irrigation de surface (« irrigation par sillons », « à la raie » ou « gravitaire »), utilise la gravité via un réseau de canaux et rigoles de taille dégressive. L'arrosage lui-même s'effectue ensuite par ruissellement, par submersion ou par infiltration dans le sous-sol proche des cultures (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>). Les systèmes d'irrigation de surface sont classés dans l'ordre croissant de leur efficacité en irrigation par ruissellement, irrigation par planches, irrigation à la raie et irrigation par bassins (Walker, (1989) : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>).

### **I-2-1 Irrigation par ruissellement**

L'eau d'irrigation est apportée par ruissellement à partir des fossés du champ sans vrai contrôle par des digues ou par d'autres méthodes limitant le mouvement de l'eau (Schwab et al 1993 cité par <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>). Bien que ces méthodes soient intéressantes pour leur faible coût initial et pour le travail demandé, elles ne le sont pas pour leur faible efficacité et leur faible uniformité. (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>).

### **I-2-2- Irrigation par planches**

L'irrigation par planches est l'apport d'eau sur des longues parcelles en pente et rectangulaire avec des conditions de drainage à l'extrémité basse du champ. Les planches sont disposées dans le sens de la plus grande pente (Schwab et al., 1993 cité par <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>). L'irrigation par planche convient très bien pour les sols ayant une vitesse d'infiltration lente et les cultures qui tolèrent un flaquage prolongé (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>).

### **I-2-3 - Irrigation à la raie**

L'eau ne couvre qu'un cinquième ou la moitié de la surface. Les raies sont placées dans le sens de la pente ou selon les courbes de niveau. Le débit unitaire est considérablement réduit et cette technique peut être pratiquée avec des pentes allant jusqu'à 12% si les raies sont placées selon les courbes de niveau avec un débit dimensionné pour être non érosif. Si les raies ne sont pas disposées selon les courbes de niveau, la pente maximale recommandée est de 3% ou moins. (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>).

#### **I-2-4 - Irrigation par bassins**

Les bassins sont généralement de forme rectangulaire, nivelés et entourés par une digue pour éviter le ruissellement. La mise en eau des bassins peut être efficace si un débit important est disponible pour recouvrir rapidement la parcelle (Schwab et al. 1993 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>). Ce système convient mieux aux sols peu filtrants et aux cultures denses à enracinement profond (Walker, 1989 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>). Le nivellement du terrain est très important pour obtenir une uniformité et une efficacité très élevées pour toutes les techniques d'irrigation de surface (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>).

#### **I-3 Irrigation par aspersion**

Cette technique fournit l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle (Louis Jean, 2009 et Dunglas, 2014 cités par M'Sadak Y. et al., (2017)). L'irrigation par aspersion utilise des canalisations souterraines où l'eau circule sous forte pression. Ces canalisations alimentent en eau des tuyaux mobiles auxquels sont raccordés des systèmes d'aspersion (arroseurs canons) : les cultures sont alors arrosées par une fine pluie artificielle. (<https://arrosage.ooreka.fr/comprendre/irrigation>). Cette technique consiste à imiter l'effet des précipitations : l'eau, acheminée sous pression par des tuyaux flexibles, est propulsée en l'air sous forme de gouttelettes, lesquelles retombent sur les cultures autour de chaque asperseur. (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>). L'irrigation par aspersion convient à n'importe quels types de cultures, de sols et de topographies (Schwab et al. 1993 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>). Les sols ne sont pas saturés, ce qui limite les pertes et évite les phénomènes d'asphyxie. Le système peut aussi servir à la lutte antigel (Dunglas, 2014 cité par M'Sadak Y. et al., (2017)). En général les systèmes sont définis selon le type de déplacement des rampes sur lesquelles sont fixés différents types d'asperseurs. Les rampes sont fixes ou mobiles. Dans ce dernier cas elles sont déplacées manuellement ou mécaniquement. L'irrigation par aspersion a une efficacité élevée mais pose des problèmes dus aux exigences en main d'œuvre et aux coûts d'investissement (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>).

Un pivot est constitué par une canalisation tournant autour d'un point pivot central sous l'action de la pression d'eau, de moteurs électriques ou de moteurs hydrauliques à huile (Schwab et al., 1993 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>). Différents types de buses, à différentes hauteurs et avec différentes pluviométries peuvent être utilisés sur

les pivots. Pour avoir la meilleure efficacité possible, le choix des asperseurs doit correspondre aux conditions de sol. Les rampes frontales utilisent des structures semblables à celles des pivots mais dans le champ elles se déplacent parallèlement à elles-mêmes. Dans le cas de la couverture intégrale les asperseurs sont installés sur l'ensemble de la parcelle et tous ou seulement quelques-uns fonctionnent en même temps (Howells, 2003 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>).

L'évaluation menée par M'Sadak Y. et al., (2017) en Tunisie a décelé une sensibilité de l'aspersion classique au vent surtout avec une pression de service un peu plus élevée assurant une portée du jet plus importante et des gouttelettes plus fines facilement transportées par le vent ce qui nécessite une régulation de la pression.

Elle permet d'économiser l'eau dans une proportion allant jusqu'à 50% par rapport à l'arrosage par ruissellement (Olier et Poirée, 1983 cité par M'Sadak Y. et al., (2017)),

#### **I-4 La submersion**

L'irrigation par inondation ou submersion consiste, à recouvrir d'eau la parcelle. C'est la technique appliquée dans les rizières (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>).

#### **I-5 Irrigation localisée**

##### **I-5-1 Définition de l'irrigation localisée**

La micro-irrigation est un ensemble de systèmes parmi lesquels on trouve le goutte à goutte (Bousquet N. (2014). L'irrigation localisée ou micro-irrigation par système du goutte-à-goutte consiste à apporter de l'eau sous faible pression uniquement au voisinage des racines (<https://arrosage.ooreka.fr/comprendre/irrigation>). La micro-irrigation achemine l'eau jusqu'aux racines des plantes, de manière très localisée et uniquement à la quantité nécessaire, ce qui permet en outre d'éviter le ruissellement source de pertes de minéraux et nutriments solubles. Le « goutte-à-goutte » est le plus utilisé en micro-irrigation : irriguant lentement les racines des plantes via des tuyaux et de goutteurs, soit en coulant à la surface du sol, ou en irriguant directement la rhizosphère (on parle alors de goutte à goutte enterré, qui économise beaucoup d'eau avec aussi une économie d'intrants s'ils sont acheminés directement vers la plante par moyen de fertigation (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>). Elle comprend : les micro-asperseurs et le goutte à goutte (de surface et enterré). Les micro-asperseurs correspondent à des petits distributeurs placés sur de petits tubes au-dessus de la surface du sol. Les installations d'irrigation par micro-asperseurs ont une sensibilité plus faible au colmatage.

Le système goutte à goutte apporte l'eau directement à la zone racinaire des plantes minimisant ainsi les pertes par percolation, réduisant ou supprimant la surface mouillée permettant à l'eau de s'évaporer et éliminant les pertes par ruissellement (Colaizzi et al., 2003 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>).

### **I-5-2 Avantages**

En irrigation localisée, seul la fraction du sol exploitée par les racines est continuellement humectée, ce qui limite l'évaporation, diminue la percolation en profondeur de l'eau d'irrigation (Tangara B. et al. (1996). La fréquence élevée des arrosages permet une dilution des sels présents dans la solution du sol sous le distributeur et un maintien des sels à la périphérie du bulbe humecté (Tangara B. et al. (1996). Le goutte à goutte peut réaliser des économies d'eau de 5 à 15 % (jusqu'à 20 % selon les conditions pédoclimatiques (Gabriel H., (2014). Elattir, (2005) de son côté a rapporté que cette technique permet une réduction de l'évaporation et une diminution de la percolation de l'eau. De sa part Hachicha M. et Hallair V. (2002) ont rapporté que le goutte à goutte provoque une augmentation de la porosité d'assemblage et un émiettement des agrégats dans les cinq premiers centimètres du sol. Le développement de cette macroporosité apparaît comme un élément favorable pour éviter la salinisation et la dégradation physique du sol. Phocaidés A., (2008), signale que le goutte à goutte présente le meilleur rendement de l'irrigation à la parcelle comparée aux autres techniques d'irrigation (Irrigation de surface : 50 à 70 %, Irrigation par aspersion : 80 à 90 %, Irrigation localisée : 90 à 95 %). El Attir H., (2005) a montré que le goutte à goutte assure une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau et des engrais entraînant ainsi une diminution de perte de solution par lessivage et par conséquent une diminution de la pollution des nappes phréatiques par les engrais. Selon Saitter M. et al., (2007), l'irrigation localisée limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. Gabriel H., (2014) rapporte qu'il est possible d'irriguer des sols difficiles peu perméables (risque de flaquage avec l'aspersion) et des sols très légers (très faible capacité de rétention ou percolation rapide de l'eau en irrigation de surface).

### **I-5-3 Inconvénients**

Ce système d'irrigation n'est pas sans inconvénients liés au coût élevé par rapport aux systèmes d'aspersion et le risque de colmatage mécanique considéré comme le 1<sup>er</sup> obstacle à la réussite de la technique du goutte à goutte dans les pays en voie de développement, et qui impose un bon système de filtration (Phocaidés A., (2008). De sa part Elattir H., (2005), a

souligné que plus de 80% des exploitations micro-irriguées souffrent de ce problème. Elamri A. et al., (2012) ont précisé que le phénomène de colmatage entraîne une mauvaise répartition de l'eau au niveau de la parcelle et affecte la croissance et le développement des cultures entraînant des effets négatifs sur les rendements quantitatifs et qualitatifs des cultures. Saltani et al., 2004 cités par Elamri A. et al., (2012) ont rapporté que le phénomène de colmatage des distributeurs a pour conséquence de raccourcir la durée de vie de l'installation déjà coûteuse au départ. Saitter M. et al., (2007) ont précisé que compte tenu de la diminution de la teneur en eau avec l'éloignement de l'émetteur, la conductivité et les flux hydrauliques se réduisent et la concentration en sels augmente progressivement pour créer une accumulation à la périphérie du bulbe.

## **II- Efficacités des systèmes d'irrigation**

L'efficacité des systèmes d'irrigation agricole peut se mesurer par le rapport entre la quantité d'eau stockée par les racines pendant l'irrigation sur la quantité totale d'eau apportée (<http://blog.agriconomie.com/les-modes-d'irrigation-presentation-et-comparaison/>). Les différences entre les efficacités des différents systèmes d'irrigation portées sur le tableau ci-dessous, résultent de variations dans le ruissellement, les percolations profondes et parfois l'évaporation. Mais la différence ne résulte pas de modifications dans la quantité d'eau consommée par la plante par transpiration (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>).

**Tableau 1** : Efficacité au champ (%) des systèmes d'irrigation (Howells, 2002 :

<http://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>)



<b>Systèmes d'irrigation</b>	<b>E (%)</b>	<b>Systèmes d'irrigation</b>	<b>E (%)</b>
<b><u>Irrigation surface</u></b>		<b><u>Pivots</u></b>	
- Irrigation à la raie (inclinée)	50-80	- Asperseurs à batteur avec canon d'extrémité	75-90
- Irrigation à la raie (horizontale)	65-95	- Asperseurs à batteur avec canon d'extrémité	75-95
- Irrigation par planche	50-80	- Système LEPA sans canon d'extrémité	90-95
- Bassins plats	80-95		
<b><u>Systèmes de micro irrigation</u></b>		<b><u>Aspersion (sauf pivots)</u></b>	
- Goutte à goutte de surface	70-95	- Aspersion avec déplacement	60-85
- Goutte à goutte enterré	75-95	- Side Roll	60-85
- Micro asperseurs	70-95	- Canon déplaçable	55-75
		- Rampes Frontale : Sprays (alimentation par tuyau)	75-95
		- Sprays (alimentation par canal)	75-95

Lorsque l'on décide de changer de méthode d'irrigation, les économies d'eau que l'on peut espérer sont égales à la différence entre les valeurs de l'efficacité au champ pour les deux techniques (<http://eriser.ma/techniques-d'irrigation-agricole/>). C'est en fin de compte la qualité de la conception de l'installation, sa gestion et sa maintenance qui détermineront le niveau d'efficacité effectif (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>). D'un point de vue de la préservation de l'eau, les économies en eau augmentent lorsque l'on passe de l'irrigation de surface à l'aspersion et de l'aspersion à la micro irrigation (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>).

### **III - Terminologie de l'Évapotranspiration**

#### **III -1 Évapotranspiration potentielle (ETP)**

Elle traduit la demande climatique et représente l'ET de la culture dans les conditions de saturation totale des surfaces évaporantes et de l'air environnant. Ces conditions sont théoriques, jamais atteintes dans la réalité (Bouazzama, (2013)).

#### **III -2 Évapotranspiration de références (ET°)**

Doorenbos et Pruitt 1977 cités par Elame TM., (2017) définissent l'ET0 comme étant l'évapotranspiration d'une surface étendue de gazon, ayant une hauteur de 8 à 15 cm, poussant activement, ombrant complètement le sol et ne manquant pas d'eau.

#### **III - 4 Évapotranspiration maximale (ETM) ou (ETc)**

Cette notion est introduite par les bio- climatologues et les agronomes et représente l'évapotranspiration d'un couvert végétal donné, indemne de maladies et se développant dans des conditions non limitantes en eau et en fertilisants. Selon Ammari O. et Bayali N., 2016 l'évapotranspiration maximale (ETM) reste une grandeur pertinente pour apprécier la relation entre le climat et la plante et estimer son besoin en eau. Doorenbos et Kassem, 1979 cités par Elame TM., (2017) définissent l'ETM d'une culture comme étant l'apport de l'eau qui satisfait complètement les besoins en eau de cette culture et lui assure une croissance et un développement sans restriction. L'évapotranspiration de la culture (ETc) ou l'évapotranspiration maximale (ETM) qui correspond aux besoins en eau est mise en relation avec l'évapotranspiration de référence (ET0) par l'intermédiaire d'un coefficient cultural (Kc)

$$ETM = Kc * ET^0$$

Doorenbos et Kassem, 1980 cités par Elame TM., (2017) confondent ETc avec l'ETM de la culture spécifique, et la relation devient alors :

$$ETc = ETM = Kc * ET^0$$

L'Évapotranspiration Réelle (ETR) peut être définie comme étant la quantité d'eau perdue par une culture dans les conditions réelles où elle se trouve.

Parmi les méthodes d'estimation de l'ETR, on trouve le bilan hydrique qui permet de suivre, selon une méthode simple, l'état de la réserve en eau du sol.

Selon Ammari O. et Bayali N., (2016), le bilan hydrique peut être résumé à :

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

Avec :

- ETR : évapotranspiration réelle en (mm/j) ; P : Pluie (mm) ;
- I : apport d'irrigation (mm) ; RC : remontées capillaires
- D : drainage sous la zone racinaire  $\Delta S$  : variation de stock d'eau du sol (mm),  $\Delta S$  Peut-être approchée par la variation de la réserve utile :

$$\Delta S = \Delta RU = RU_f - RU_i \text{ (Finale-initiale)}$$

#### **IV- Statut hydrique du sol**

La méthode réflectométrique permet la surveillance et la mesure de l'humidité du sol (Sakellariou-Markantonaki M. et al., 1997 cité par Sakellariou-Markantonaki M. et al., (2002)). Cette technique n'est pas radioactive, rapide et indépendante du type de sol (à l'exception des cas de sols extrêmes). Le principe de fonctionnement de cette méthode est basé sur la mesure directe de la constante diélectrique du sol et sa conversion en humidité volumique (Topp ad Davis, (1985) ; Zagelin et al., 1992 cité par Sakellariou-Markantonaki M. et al (2002)).

Masmoudi, 1990 cité par Boutheina D. et Boujelbane A. (2010) a rapporté que le plan du flux nul est d'une importance capitale car il joue le rôle d'un indicateur des pertes d'eau par percolation et de l'irrégularité de l'alimentation hydrique de la culture. Boutheina D. et al., (2012), ont conclu que le stock d'eau dans le sol augmente remarquablement suite à une irrigation ou à une pluviométrie et décroît entre deux irrigations successives en absence de pluie. Cette diminution du stock d'eau devient plus rapide au fur et à mesure que le climat devient plus chaud et que la culture atteint un stade végétatif plus avancé. L'importance des racines dans l'horizon du sol explique les variations du stock d'eau dans le sol (extraction de l'eau par les racines). Boujelbane, 2000 cité par Boutheina D. et al., (2012), a conclu que plus la variation d'humidité n'est faible, plus les conditions du sol sont stables favorisant un bon développement végétatif de la plante.

#### **V - Notion de l'analyse diagnostic des systèmes d'irrigation localisée**

Selon Ferraton N. et Tuzard I. (2009), La démarche diagnostic permet une meilleure compréhension des pratiques paysannes et de produire des solutions pour améliorer leurs systèmes de production. Selon Delarue J. (2007), L'évaluation d'impact des projets de développement est aujourd'hui dominée par les méthodes quantitatives : expérimentales ou quasi-expérimentales. Elles sont toutefois difficilement applicables aux projets de développement agricoles, et elles ne permettent pas de quantifier l'impact sur toute la durée de vie des réalisations. Une nouvelle méthode, l'évaluation systémique d'impact, permet à la fois de comprendre les processus par lesquels l'impact se matérialise et de quantifier rigoureusement

l'impact des projets de développement agricole sur le revenu des producteurs. L'analyse repose notamment sur la compréhension des dynamiques agraires et des stratégies des agriculteurs, et permet de quantifier l'impact ex-post mais également d'en modéliser ex-ante l'évolution pour les années suivantes. Selon Renault D. (2008), le diagnostic de la qualité des performances existantes constitue souvent la phase la plus importante du processus de modernisation. Il donne une bonne indication des contraintes et des domaines posant problèmes dans le système. Cette approche traite les goulots d'étranglement, ainsi que les niveaux de performance et de service, au sein d'un système d'irrigation, comme elle fournit une image claire des améliorations à apporter et apporte en outre des indicateurs initiaux pouvant servir de référence à la comparaison des performances avant et après la mise en œuvre des plans de modernisation.

L'appréciation de la qualité de l'eau d'irrigation et celle du sol du site d'étude constitue à cet effet un prérequis à toutes actions visant à diagnostiquer un système d'irrigation dans toutes ces composantes.

### **V-1 Appréciation de la qualité de l'eau d'irrigation et du sol**

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour les rendements des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement (<http://www.Lenntech.fr>). Les eaux d'irrigation sont classées selon leurs qualités physiques, chimiques biologiques. Cette classification semble adéquate pour qualifier l'aptitude des eaux d'irrigation pour la production des cultures et les risques potentiels de colmatage ou de bouchage des distributeurs (Phocaidés A., (2008)).

Dans ce qui suit, seuls les paramètres d'évaluation chimique de l'eau d'irrigation seront abordés.

#### **V-1-1-Qualité chimique de l'eau**

La qualité de l'eau d'irrigation peut être mieux déterminée par une analyse chimique en laboratoire. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont : Le pH, Risque de salinité, risque de Sodium (Degré d'Adsorption du Sodium ou SAR), Carbonates et bicarbonates en relation avec les teneurs en Calcium et Magnésium, anions toxiques, chlore libre..., (<http://www.Lenntech.fr>). Pour déterminer le degré d'aptitude de l'eau à l'irrigation, il y a lieu de considérer les problèmes liés à sa teneur en sels, à son action sur la perméabilité des sols, à la présence d'ions toxiques pour la croissance de végétaux et à des effets secondaires sur l'aspect de la plante (Landreau A. et Monition L., (1977))

### **V-1-1-1 Risque de salinité :**

La salinité est un problème qui se pose couramment aux exploitants irrigant dans les climats arides, en raison des sels solubles contenus dans toutes les eaux d'irrigation. La concentration en sels de la majeure partie des eaux d'irrigation est comprise entre 200 et 4000 mg/l de la quantité totale de matière dissoute « TDS » (Phocaidès A., (2008)). La teneur en sels des eaux d'irrigation joue un rôle important vis à vis des effets directs sur les végétaux et les risques de salinisation du sol. Les critères d'appréciation de la qualité de l'eau en liaison avec les risques de salinisation, sont la conductivité électrique (CE) et anciennement par le taux d'adsorption du sodium –SAR- (Mermoud A., 1995 cité par Compaoré ML., (2003)). La conductivité électrique ou la concentration totale des sels (Saitter M. et al, (2007)) est un paramètre physique très important, car il traduit le degré de minéralisation des eaux (Berrouch H., (2011)). Le tableau ci-après donne la classification de l'eau en fonction de la salinité :

**Tableau 2** : Classification de l'eau en fonction de la salinité (Phocaidès A., (2008))

	<b>CE (dS/m)</b>	<b>TDS (mg/l ou ppm)</b>
<b>Eau non saline</b>	<b>&lt; 0,7</b>	<b>&lt; 500</b>
<b>Eau saline</b>	<b>0,7 - 4,2</b>	<b>500 - 30 000</b>
<b>Eau légèrement saline</b>	<b>0,7 - 3,0</b>	<b>500 - 2 000</b>
<b>Eau modérément saline</b>	<b>3,0 - 6,0</b>	<b>2 000 - 4 000</b>
<b>Eau très saline</b>	<b>&gt; 6,0</b>	<b>&gt; 4 000</b>
<b>Eau très fortement saline</b>	<b>&gt; 14,0</b>	<b>&gt; 9 000</b>
<b>Saumure</b>	<b>&gt; 42</b>	<b>&gt; 30 000</b>

La salinité du sol et de l'eau constitue le problème majeur dans beaucoup de pays du monde (Szablcs, 1979 cité par Masmoudi A., (2011)). Selon Dubost, 1994, cité par Masmoudi A., (2011), au Sahara les eaux contenant moins de 0.5 g/l de sels peuvent être considérées comme exceptionnelles et celles de moins de 1 g/l sont parfaites pour la consommation humaine. Jusqu'à une concentration de 2 g/l, ce sont des eaux d'irrigation de qualité excellente

pour l'irrigation. Entre 2 et 5 g/l, il s'agit d'eaux salées et au-dessus de 5 g/l on peut dire qu'elles sont très salées.

Le seuil de la salinité des eaux d'irrigation est de 3 ds/m, soit 2 g/l (Ayers et Westcot, 1994 cité par Masmoudi A., (2011)). Mais compte tenu de la forte évaporation, même cette concentration saline cause parfois de sévères problèmes aux plantes, surtout dans les sols à texture fine ou irrigués par intermittence des sels (Daoud et Haltim, 1994 cité par Masmoudi A., (2011)). En règle générale, un doublement de la valeur de la CEE entraînera une baisse de production de l'ordre de 50 % (Noomene, H., (2011)). Les eaux salées peuvent être utilisées en irrigation sur certains sols si des pratiques appropriées de gestion sont appliquées (Hamdy, 1991 cité par Masmoudi A. (2011)). Des résultats d'essais conduits sur la culture de tomate dans la région Saharienne d'Algérie avec des salinités croissantes (3, 5, 7, et 9 ds/m) ont montré un effet très important de la fréquence d'irrigation sur le comportement de la plante vis-à-vis la salinité. En effet, lorsqu'on augmente la fréquence d'irrigation on peut utiliser des salinités relativement élevées des eaux d'irrigation. Néanmoins, les traitements relativement moins salés restent toujours les meilleurs (Masmoudi A, (2011)).

#### **V-1-1-2 Risques liés au sodium :**

Un problème de perméabilité du sol se produit lorsque l'eau d'irrigation présente une teneur élevée en sodium (<http://www.Lenntech.fr>, Ouyse, 2005 cité par Berrouch H., (2011)). Ces ions sont attirés par les particules du sol chargées négativement, remplaçant les cations dominants du calcium et du magnésium, ce qui entraîne la dispersion des agrégats du sol et la détérioration de sa structure, rendant le sol imperméable à l'eau et à l'air. L'augmentation de la concentration du sodium échangeable peut entraîner une augmentation du pH du sol au-dessus de 8.5 et une réduction de la disponibilité de certains micronutriments, comme le fer et le phosphore (Phocaidès A., (2008)). Certains constituants peuvent réduire la perméabilité du sol et la plante ne reçoit plus, alors la quantité d'eau dont elle a besoin pour sa croissance. Habituellement, la perméabilité est liée à une pauvreté en Calcium et Magnésium ou à un excès de sodium. Dans certains cas, les carbonates et les bicarbonates en se décomposant et en se dispersant créent des obstacles à la circulation de l'eau et il convient de les prendre en considération. L'application du gypse constitue un palliatif souvent efficace. Ces problèmes de perméabilité peuvent être évalués par le concept –SAR (Montion L., 1969 cité par Landreau A. et Monition L., (1977)). L'utilisation des eaux usées traitées, en comparaison aux eaux de nappe, a significativement amélioré la stabilité structurale du sol pour la couche superficielle malgré la structure légère (Chenini F. et al., (2002)). Pour maintenir les conditions d'infiltration

adéquates dans les sols irrigués, il faut veiller à empêcher les complexes d'échange du sol de se charger en ions sodium. Le danger de sodicité d'une eau d'irrigation est exprimé par le SAR - Sodium Adsorption Ratio - (Berrouch H., (2011)) :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ \div ((\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2)^{1/2}$$

Où les ions sont exprimés en meq/l.

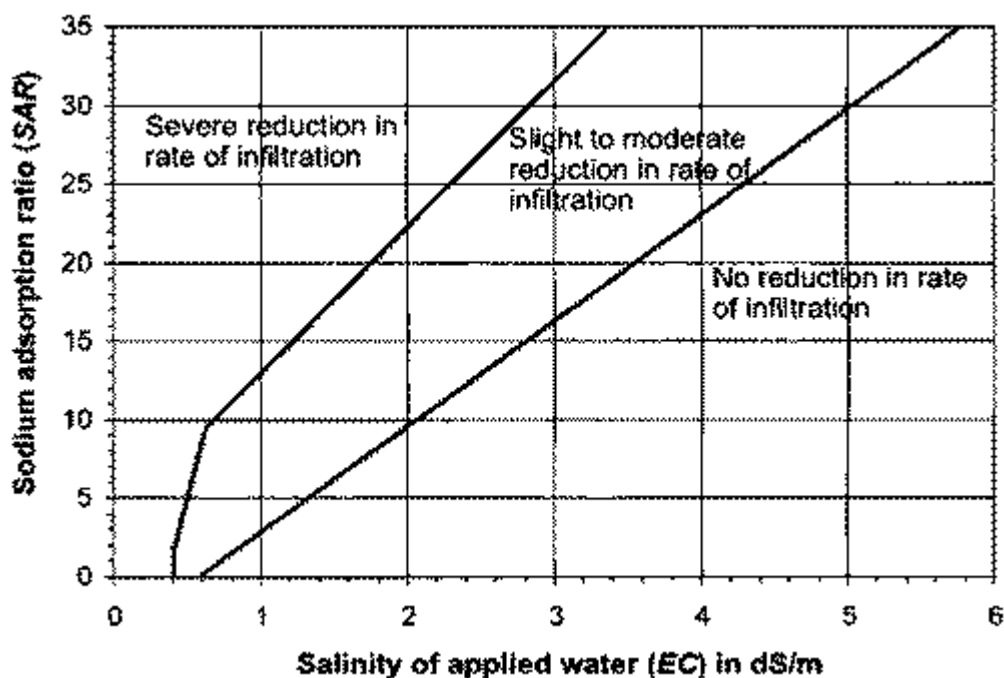
Cet indice est généralement un bon indicateur du statut du sodium qui se produit dans le sol (Lamm FR. et al., (2006)). Le SAR des eaux d'irrigation, est conseillé pour représenter le degré d'alcalisation des eaux d'irrigation et le risque de la baisse de perméabilité des sols (Laraque A.). Le SAR définit la quantité de sodium susceptible d'être adsorbée par le sol (Phocaidès A., (2008)). Le problème de dispersion du sol est relié avec plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type du sol : les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux plus lourds une fois irrigués avec de l'eau à haut SAR (<http://www.Lenntech.fr>). Les sols qui présentent un sodium échangeable supérieur 15 sont sérieusement affectés par le sodium adsorbé. L'utilisation d'une eau avec une valeur du SAR élevée et une salinité basse à modérée peut être risquée et réduit le taux d'infiltration du sol (Phocaidès A., (2008)). Même en cas de faible salinité totale, une concentration en sodium relativement excessive (risque alcalin) peut provoquer la dispersion des minéraux argileux et entraîner une dégradation de la structure du sol (Saitter M. et al., (2007)). Le risque de dégradation de la structure du sol et l'altération de ces qualités physiques est fonction du Taux de sodium échangeable (< 10 : Faible, 10 < SAR < 18 : Moyen, 18 < SAR < : 26 Elevé, > 26 Très élevé : <http://hydram.epfl.ch/docs/Irrigation-basic.pdf> et Saitter M. et al., (2007)). Une eau un très saline (EC>1.5 dS/m ou mmhos/cm) et une grande quantité de sodium (SAR>6) ne devrait pas être utilisée pour l'irrigation des cultures (<http://www.Lenntech.fr>). Les sols ayant un ESP (taux de sodium échangeable) ou un SAR supérieur à 15 sont considérés sodiques avec une tendance à la défloculation et le sol devient imperméable à l'eau et l'air (Sanchez C.A. et Silvertooth J.C., (1996)).

#### **V-1-1-2-1 Diagramme de Richard (Riverside)**

La relation entre le SAR (Taux d'Adsorption du Sodium) et l'indice de salinité (ECi) se traduit de la manière suivante : À un SAR donné, le taux d'infiltration augmente avec certaines conditions comme, notamment, la salinité. Donc le SAR et le ECi devraient être utilisés en combinaison pour évaluer des problèmes potentiels. Pour une eau très faiblement salée, une eau

avec, pourtant, un SAR faible doit être évitée. Mais, une eau très salée (EC : 1.50 à 3.00 dS/m) avec un SAR au-dessus de 4, doit être soigneusement gérée. Il est recommandé que, une fois par an, les sols doivent être soumis à des tests afin de détecter d'éventuel problème dû au sodium.

Plus la salinité sera élevée, plus l'indice SAR pourra poser des problèmes d'infiltration. Mais, plus la salinité sera basse, plus les problèmes d'infiltration seront indépendants de la valeur du SAR ([https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/sar/irrigation/sar-risque-pour-eau-irrigation .htm](https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/sar/irrigation/sar-risque-pour-eau-irrigation.htm)).



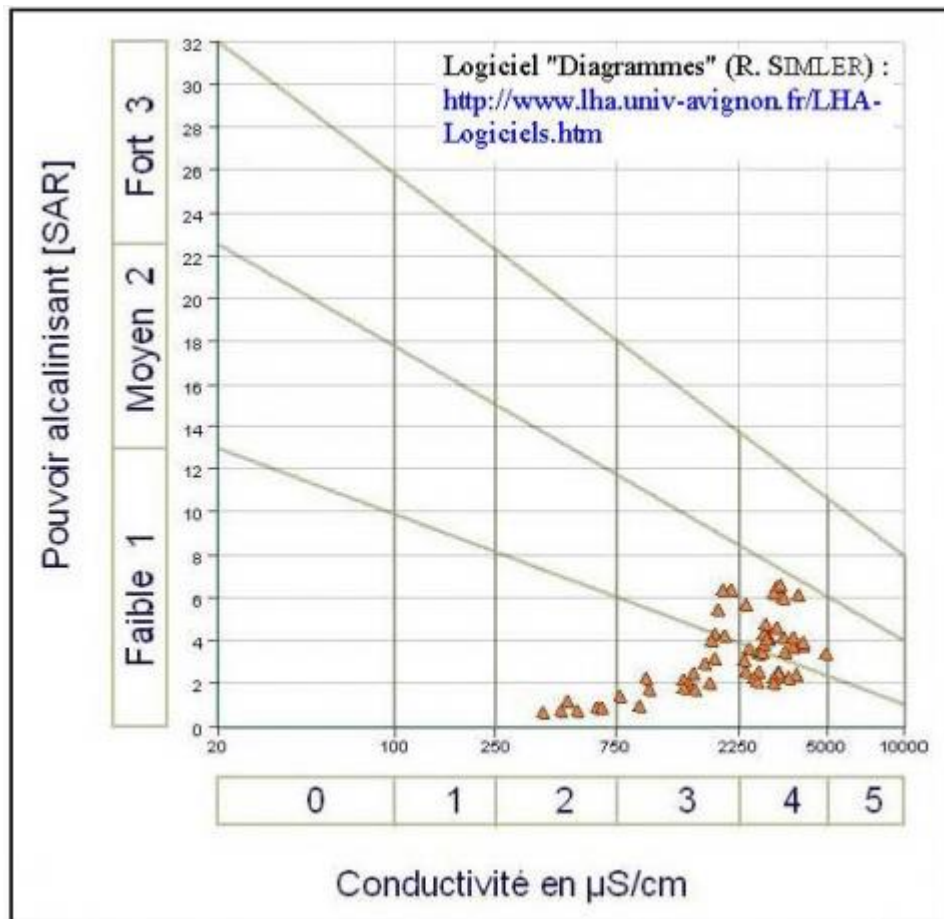
**Figure 1:** Représentation sur le diagramme de RICHARDS (Riverside)

Le degré d'imperméabilisation du sol en fonction du SAR et ECi eau.

(<https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/sar/irrigation>

[/sar-risque-pour-eau-irrigation .htm](https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/sar/irrigation/sar-risque-pour-eau-irrigation.htm)).

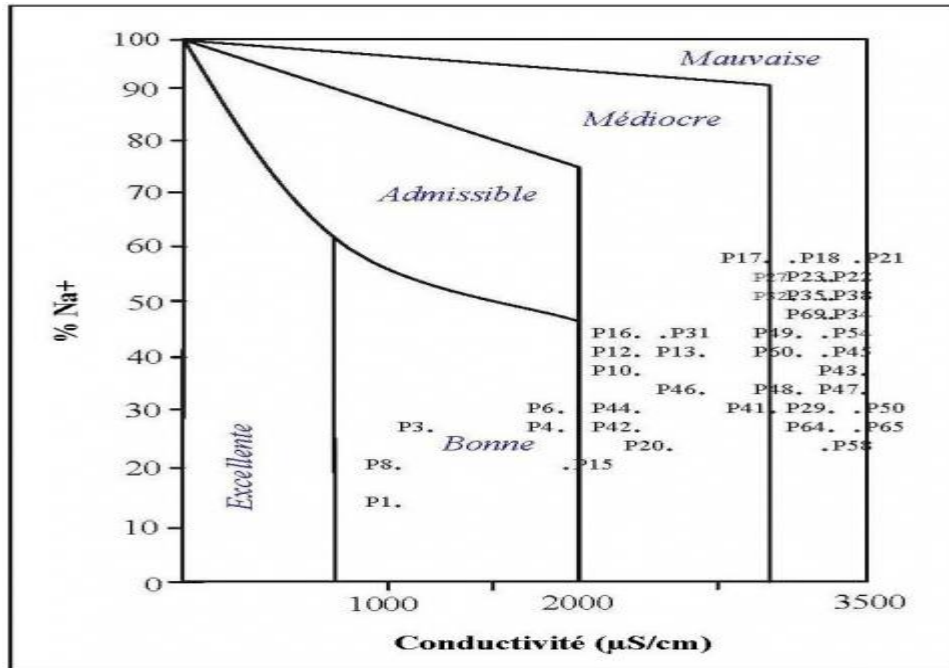




**Figure 2: Diagramme de Richards des eaux de la nappe de Meskiana Prelevées en juillet 2008 (Guaidia L et al. (2012))**

#### **V-1-1-2-2 Diagramme de Wilcox modifié**

Ce diagramme qui fait intervenir la conductivité électrique et le %  $\text{Na}^+$  apprécie la qualité des eaux d'irrigation en eau excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise (Guaidia L. et al. (2012))



**Figure 3** : Appréciation des eaux de la nappe de Meskiana selon le Diagramme de Wilcox -Prélevement de juillet 2008- (Guaidia L et al. (2012))

### V-1-1-3 Carbonate de sodium résiduel (RSC).

Il est défini comme étant la différence en milliéquivalent par litre entre les ions de bicarbonate et les ions de calcium et de magnésium (Phocaidés A., (2008)) :

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Le Calcium et le Magnésium peuvent réagir avec le bicarbonate, et être précipités comme carbonates de calcium ou de magnésium ( $\text{CaCO}_3$  ou  $\text{MgCO}_3$ ) dans des conditions de sécheresse. Lorsque la concentration du Calcium et du Magnésium décroît, la teneur du sodium et l'indice SAR deviennent plus importants, ce qui entraîne une alcalinisation et le pH augmente, signifiant une teneur élevée en carbonates et bicarbonates (<http://www.Lenntech.fr>). La concentration relative en sodium échangeable dans le complexe échangeable augmente, provoquant la dispersion du sol. Quand la valeur du carbonate de sodium résiduel est inférieure à 1.25 meq/l, l'eau est considérée comme étant de bonne qualité tandis que si elle excède 2.5 meq/l, l'eau est considérée comme dangereuse (Phocaidés A., (2008)). Une forte teneur en carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et en bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) augmente la valeur du SAR d'environ 3-4 meq/l ou 180-240 mg/l (<http://www.Lenntech.fr>). Le tableau ci-dessous donne le risque des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) pour l'eau d'irrigation :

**Tableau 3** : Risque des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) pour l'eau d'irrigation

(<http://www.lenntech.fr/>)

	Risque		
	Nul	Leger à modéré	Sévère
$[\text{HCO}_3^-]$	< 1,5	1,5 à 7,5	>7,5
RSC	< 1,25	1,25 à 2,5	>2,5

**RSC** : Carbonate de Sodium Résiduel

$[\text{HCO}_3^-]$  : meq/l

#### **V-1-1-4 Eléments toxiques de l'eau d'irrigation**

Parmi les éléments reconnus toxiques, on note les concentrations en bore et en chlore. Le bore est généralement présent dans certaines eaux d'irrigation en quantité indésirable mais pas tellement toxique. Quant au chlore, sa présence excessive dans le sol exerce des effets défavorables sur la végétation et la qualité de certaines cultures (ROUABHIA A.E.K. et DJABRI L. (2010)). Certains ions comme le Bore, Chlore, et le sodium, à un certain niveau de concentration, ont un effet nocif sur la croissance des plantes. C'est pendant la phase de croissance succédant à la germination que la plante est la plus sensible à la concentration du chlore et à la conductivité électrique (Landreau A. et Monition L., (1977)). Les ions toxiques les plus communs dans les eaux sont : Le Bore (B), Chlorure (Cl) et le Sodium (Na). Le sodium et le chlorure sont habituellement absorbés par les racines. Lorsque l'absorption se fait par les feuilles le taux d'accumulation est plus grand. Le bore peut être toxique à très faible concentration. Une concentration en bore inférieure à 1mg/L est essentielle pour le développement des plantes, mais des niveaux plus élevés peuvent poser des problèmes pour les plantes sensibles. La plupart des plantes montrent des problèmes de toxicité quand la concentration du bore excède 2mg/L (Robert Morris and Dr. Dale Devitt <http://www.Lenntech.fr>). Les cultures tolèrent différemment les quantités en ions chlorure contenus dans l'eau d'irrigation. Le rendement des cultures (Chou-fleur, coton, sésame, betterave à sucre et tournesol) sont affectés si les teneurs en ions chlorure dépassent 710 mg/l (Source: Extrait des Directives Australiennes de Qualité de l'eau pour Eaux Fraîches et Maritimes (ANZECC)).

Un taux de chlore supérieur à 10 meq/l peut causer de sérieux dommages aux cultures. Le bore est extrêmement toxique même à des concentrations relativement faibles de 0.6 mg/l et est considéré en zones arides comme l'élément le plus dangereux de l'eau d'irrigation (Phocaides A., (2008)). Les expériences américaines permettent d'établir pour le bore les normes suivantes :

- \* 0.5 à 1 mg/l : Sans problèmes pour les cultures;
- \* 1 à 2 mg/l : feuilles des plantes sensibles affectées,
- \* 1 à 2 mg/l : réduction de la production des cultures sensibles ;
- \* 2 à 10 mg/l : Seules les plantes tolérantes donnent des productions satisfaisantes (Landreau A. et Montion L., (1977)).

#### **V-1-1-5 PH de l'eau**

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure l'activité en ions  $H_3O^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 et conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Il dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau (Berrouch H., (2011)). La forte alcalinité ou la forte acidité des produits agricoles est imputé au pH de l'eau (Landreau A. et Montion L., (1977)). La forte teneur en sodium induit un pH élevé. Les valeurs élevées du pH du sol, signifient une teneur élevée en carbonates et en bicarbonates (<http://www.Lenntech.fr>). Des symptômes chlorotiques dans les plantes sensibles peuvent être dus aux effets directs ou indirects du bicarbonate, comme un accroissement du PH du sol (Phocaides A., (2008)).

#### **V-1-1-6 Dynamique des sels dans le profil du sol**

Phocaides A., (2008) a rapporté qu'en irrigation par goutte à goutte, la distribution des sels dissous dans le profil du sol suit le modèle de l'écoulement de l'eau, avec une tendance à l'accumulation à la périphérie de la masse du sol humide (à la surface en raison de l'évaporation, la teneur en sels est cinq fois plus élevée que dans les couches plus profondes et augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du distributeur). Pendant la saison d'irrigation, la concentration des sels dans la zone humidifiée sous le goutteur où la plupart des racines se concentrent est basse ou modérée. L'accumulation des sels à proximité des goutteurs est inférieure à la moitié de celle qui existe entre les lignes de distributeurs. La concentration des fertilisants dans l'eau d'irrigation ne doit pas dépasser en aucun cas une  $EC = 0.5$  dS/m, qui s'ajoute à la salinité totale de l'eau d'irrigation. Landreau A. et Montion L., (1977) ont rapporté que chaque irrigation lessive habituellement la partie supérieure de la racine et le maintient à un

taux de salure relativement bas. La concentration des sels, dans les cas d'irrigations bien conduites, se fait dans la partie active du système racinaire à raison de 3 fois celle de l'eau d'irrigation. La salure de la partie inférieure des racines est de moindre importance tant que les plantes sont suffisamment humidifiées à la partie supérieure. Selon Mermoud A., 1995 cité par Compaoré ML. (2003), L'irrigation goutte à goutte pratiquée à fréquence élevée réduit les risques d'accumulation de sel et d'accroissement de la pression osmotique. En micro-irrigation, les sels ont tendance à s'accumuler dans la couche supérieure de sol et à la périphérie du bulbe d'humidification. Par contre, à l'intérieur du bulbe, la concentration est réduite. La profondeur d'accumulation dépend de la quantité d'eau appliquée et des propriétés du sol. Elle augmente lorsque les apports dépassent l'évapotranspiration. En surface, l'évaporation au voisinage de la zone saturée entourant le distributeur, provoque un dépôt de sel qui n'est pas lessivé.

## **V-2 Diagnostic hydraulique et concept de la performance hydraulique**

### **V -2-1 Cadre théorique d'analyse et d'évaluation des performances des SI.**

Abouatallah A., (2013) a rapporté qu'une évaluation du système d'irrigation (SI) devrait quantifier et exprimer l'efficacité des pratiques existantes et indiquera les améliorations possibles. Granier J., Deumier J.M., (2013), ont rapporté que les critères de productivité ou de rentabilité économique ont été toujours étudiés pour évaluer les performances des systèmes d'irrigation modernes. Selon Clemens et al., 2000 cités par Hanafi S., (2011), La performance est exprimée par différents types d'indicateurs pouvant être considérées comme appropriés s'ils correspondent aux critères de performances pertinents qualitatifs ou quantitatifs.

Phocaidés A. (2008), a rapporté que dans la plupart des systèmes de conduites sous pression, il existe un certain nombre de facteurs qui doivent être évalués pour déterminer le niveau de fonctionnement. Toutes les pressions devront se situer dans les marges prévues. La pression du distributeur ne doit pas différer de plus de 20% de la pression moyenne recommandée. Les écarts de débit des distributeurs semblables dont on mesure les pressions de fonctionnement doivent concorder avec les spécifications du fournisseur et doivent être inférieurs à 10%. Le débit total du système doit correspondre à la somme des débits moyens des distributeurs.

Plusieurs indicateurs ont été déterminés pour exprimer la performance hydraulique des systèmes irrigués :

- Le premier indicateur défini par Levine (1982) cité par Douzi J. et Jorti A., (2015), nous renseigne sur l'offre de l'eau. Il exprime le rapport entre l'offre et la demande en eau des cultures. Toutefois, cet indicateur ne renseigne pas si les cultures ont reçu la dose appropriée au temps opportun, il reflète juste le niveau de satisfaction de la demande en eau.
- Le deuxième indicateur basé sur l'application du modèle du bilan hydrique pour l'analyse de la performance du système d'irrigation (Kloezen et Garcés-Restrepo, 1998 ; Molden et al. 1998 ; Burt et Styles, 1999 cités par Hanafi S., (2011)).

Il n'y a pas d'indicateur unique qui permet de définir à lui seul et de façon appropriée la performance hydraulique d'un système d'irrigation sur une parcelle, mais d'autres indicateurs interviennent pour maintenir un niveau de teneur en eau dans le sol favorable à la croissance des plantes dans un contexte d'économie d'eau (Hanafi S., (2011)). Yacoubi S. et al., (2015) ont souligné que l'amélioration des performances des systèmes d'irrigation représente un des objectifs primordiaux en vue de limiter les pertes d'eau, de mieux valoriser l'eau d'irrigation tant sur le plan agronomique qu'économique

Il s'agit le plus souvent de :

### **V-2-2 Contrôle de la pression de fonctionnement**

Le manomètre, installé un peu partout dans le circuit d'irrigation, est la pièce importante utilisée pour contrôler la pression au niveau de l'installation. En règle générale, la différence de pression maximale admise entre deux distributeurs qui fonctionnent ne doit pas être supérieure à 20%. Les pressions de fonctionnement ( $P_f$ ) et les pertes de charge (pdc) requises à certains niveaux du réseau de distribution se présentent pour les systèmes sous pression comme suit :

- $P_f$  à l'entrée de la Conduite principale :  $P_m = 1.35 * P_a$  (pdc admise à ce niveau : 0.43 bars)
- $P_f$  à l'entête de la conduite latérale :  $P_n = 1.15 * P_a$  (pdc admise à ce niveau : 0.1 bars).
- $P_f$  au sortir du distributeur :  $P_a = 1$  bars
- $P_f$  en fin de rampe  $P_o = 0.95$  bars.
- Pertes de charges dues au frottement dans l'ouvrage de tête : 0.9 bars
- Pertes de charges mineures : 0.22 bars
- Charge dynamique totale (pression) du système : 2.65 bars

Elattir H. (2005), a précisé que la pression de l'eau à la sortie du forage et à l'entrée de la station de tête doit être de 3.1 bars. Le matériel d'injection d'engrais de type venturi, travail avec une pression d'entrée de 2.8 bars et une pression de sortie de 2.2 bars. La pression à la sortie de la station de tête doit être au minimum de 2.2 bars. La pression à l'entrée du secteur doit être de 1.2 bars. Selon Douzi J. et Jorti A., (2015), le colmatage partiel des goutteurs au

Doukkala est à l'origine de la faiblesse des débits moyens mesurés au niveau des goutteurs par rapport à leurs débits nominaux. Saltani A. et al., (2004), avancent que le colmatage du réseau d'irrigation est révélé souvent par une sous pression nominale faible et des débits inférieurs aux débits initiaux.

### **V-2-3 Indicateurs d'uniformité de distribution de l'eau.**

Un élément important de l'évaluation de la performance d'irrigation sur le terrain est l'évaluation de l'uniformité d'irrigation. Selon Hermann et al., 1990 cités par Hanafi, (2011), le Coefficient d'Uniformité (CU) est l'un des indicateurs les plus utilisés pour qualifier l'uniformité d'arrosage.

#### **V-2-3-1 Le Coefficient d'Uniformité**

L'existence ou non du problème de bouchage des goutteurs est déterminé par la mesure du coefficient d'uniformité (Abouatallah A., (2013)).

Selon Benouniche et al, 2014, cité dans l'étude réalisée dans le cadre des projets Groundwater Arena et Drip, le coefficient d'uniformité (C.U) représente la capacité de l'installation à fournir la même dose d'irrigation à l'ensemble de la parcelle. A plus de 90%, l'uniformité est considérée excellente ; plus elle est basse, plus il y a des problèmes de distribution (bouchage des goutteurs, par exemple). Le CU relève de l'état du matériel et parfois de la conception ainsi que de l'entretien du réseau.

L'étude de l'homogénéité de la répartition de l'eau au niveau du poste d'arrosage s'est basée sur le test d'uniformité et le coefficient d'uniformité proposé par Keller et Karmeli, 1974 cité par Bouazzama B. et Bahri A. (2007) ; Bouazzama et al., (2015), El Amri et al., (2014) et Karmeli et Killer, 1978 cité par Abouatallah A, (2013). Ce Coefficient (CU) est défini comme suit :

$$\text{CU (\%)} = (q_{25} / q) * 100,$$

Avec :

- $q_{25}$  : Débit moyen (l/h) du quartile inférieur (4 plus faibles valeurs).
- $q$  : débit moyen (l/h) des 16 goutteurs mesurés.

Ce test tient compte de l'écart relatif entre les débits les plus faibles et le débit moyen des distributeurs et nous renseignera sur les problèmes éventuels de colmatage ou une hétérogénéité dans la fabrication du matériel. Ces deux phénomènes peuvent être décelés après la mesure du débit pour un échantillon de 16 goutteurs uniformément répartis sur le secteur d'irrigation (Cemagref, (2003) cité par. El Amri A et al., (2014) en suivant le protocole décrit

dans le bulletin FAO 36 (Vermeiren L. (1983). Benouniche M. et al., (2014), El Amri et al., (2014), ont proposé la classification dressée dans le tableau ci-après :

**Tableau 4** : Classes d'uniformité de distribution de l'eau Vermeiren L. (1983)  
Benouniche M. et al., (2014), El Amri et al., (2014)

Classes	Appréciation
CU > 90 %	Bonne uniformité : Pas d'intervention sur le réseau
70% < CU < 90%	Moyenne uniformité : Le réseau doit être nettoyé
CU < 70%	Uniformité médiocre (*)

(\*) Il faut chercher les causes de Colmatage et envisager une intervention pour rétablir le bon fonctionnement du réseau.

En irrigation localisée, les rampes portant les goutteurs sont dimensionnées (diamètre et longueur) de manière à ce que la différence de débit entre les différents éléments n'excède pas 10% du débit moyen. Compte tenu des caractéristiques des goutteurs, cela conduit à tolérer un maximum de différence de charge de 10 à 15 % et de 20% de la pression moyenne respectivement pour les goutteurs à long cheminement et les goutteurs à régime turbulent (Clément R. et al., (1990)). D'après les résultats avancés par Douzi et Jorti, (2015) au périmètre des Doukkala, l'intervalle de l'efficience d'application de l'eau en irrigation varie entre 52 et 85% dans l'ensemble des exploitations enquêtées. Les exploitations qui ont un coefficient d'uniformité entre 89 et 93%, ont une efficience d'application satisfaisante (de 80 à 85%), alors que ceux qui ont un coefficient d'uniformité entre 57 et 84% ont une efficience d'application médiocre à mauvaise (52 à 76%). Les résultats de l'étude menée par Elamri et al en 2012 dans le périmètre de Zaafaraa en Tunisie, montrent que les valeurs des Coefficients d'Uniformité (CU) obtenus dépassent largement les 90%, Ce qui dénote le bon fonctionnement du réseau d'irrigation et l'absence de colmatage dans les conditions de l'expérimentation. Benouniche M. et al., (2014) ont mis en exergue au niveau des exploitations agricoles de la région du Saïs quatre problèmes pouvant expliquer les valeurs très basses du CU à savoir les problèmes de conception des systèmes d'irrigation, système de filtration incomplet ou absent, mauvais entretien des systèmes d'irrigation et le remplacement de l'équipement défectueux ne se fait pas à temps). Selon une étude effectuée par Saltani A., et al., (2004) auprès de 14 exploitations



ayant adopté l'irrigation de goutte à goutte dans la zone de Cherfchef dans la basse vallée de la Medjerda-Tunis, les défauts d'installation et d'entretien du matériel sont généralement la cause d'un faible coefficient d'Uniformité (valeur de 58 à 96%).

Won-Ho Nam et al. (2012) en évaluant les performances du système d'irrigation goutte à goutte dans un environnement sous serre en Koré, ont observé des uniformités statiques d'arrosage qui baissent avec la diminution de l'espacement entre émetteurs (91.5% et 96.2% respectivement pour des espacements entre goutteurs de 10 et 30 cm). Hanafi S., en 2011 a constaté une mauvaise conduite de l'irrigation localisée. La vétusté du matériel, l'inadaptation de la station de filtration au débit utilisé et le colmatage des distributeurs affectent fortement l'efficacité de distribution à la parcelle et le coefficient d'uniformité des goutteurs. Les coefficients d'uniformité ont varié entre 20 et 86%, avec une valeur médiane de 61%, et l'efficacité de distribution à la parcelle entre 54 et 83%.

Selon Nadon, S. et al., (2016) il peut exister un décalage entre les performances théoriques et réelles des systèmes d'irrigation. Ce problème, qui est généralement sous-estimé, voire ignoré par le producteur, peut affecter grandement l'uniformité et l'efficacité de l'irrigation. Il est donc essentiel d'intégrer, au raisonnement de la régie d'irrigation, l'évaluation de la performance du système d'irrigation. Les Causes potentielles de non-uniformité pour le Goutte à goutte à la surface du sol est le Colmatage des goutteurs par intrusion de sédiments

#### **V-2-4 Efficience d'un système**

##### **V-2-4 -1 Définition du Concept et types d'efficience**

On désigne par efficacité ou par efficacité d'un système le rapport entre les quantités d'eau effectivement utilisées et les quantités dérivées en tête d'aménagement. Cette notion s'apparente donc à un rendement. (Clément R., et al., (1990)). Les définitions du terme « efficacité » utilisés diffèrent selon les disciplines scientifiques concernées : Ainsi, pour les ingénieurs de l'irrigation s'intéressant aux volumes et aux débits, l'efficacité mesure un rendement et des pertes entre deux points (entrée et sortie) le long du système d'irrigation (Bouaziz A. et al. (2002). Granier J., Deumier J.M., (2013)), ont rapporté qu'outre l'amélioration de l'efficacité des plantes par le progrès génétique, des marges de progrès sont possibles en recherchant une meilleure maîtrise des pertes d'eau à tous les niveaux. Ces pertes sont liées pour une bonne part aux techniques d'irrigation utilisées, et l'indicateur qui nous permet de les apprécier est l'efficacité de l'eau d'irrigation qui n'est autre que le volume d'eau d'irrigation disponible pour la plante par rapport au volume d'eau prélevé à la source.

Plusieurs concepts d'efficacité existent et nous citons à titre indicatif :

#### **V-2-4-2 Efficience productive.**

Le concept d'efficience au sens large est employé pour caractériser l'utilisation des ressources, on peut dire que l'efficience est un rapport au sujet des performances d'un processus transformant un ensemble d'intrants en un ensemble d'output (Boussemart, 1994 cité par Harbouze R. et al. (2009)).

Harbouze R. et al. (2009), dans une étude sur les efficacités économiques comparées des systèmes de production au périmètre du Gharb, a formulé un modèle DEA (Data Envelopment Analysis) pour chaque unité décisionnelle k « Decision –Making Unit ou DMU » qui transforme des inputs (charges) en outputs (produits) de la manière suivante :

$$E_k = \frac{\sum \text{pondérée outputs}}{\sum \text{pondérée inputs}}$$

Farrell est le premier auteur à proposer une définition de l'efficience en deux composantes :

#### **V-2-4-3 Efficience allocative**

Le terme d'efficience allocative est employé par Farrell pour désigner l'efficience – prix. Ainsi, l'efficience allocative est l'utilisation des inputs dans des proportions qui correspondent à l'optimalité décrite par les prix relatifs des inputs (Harbouze R. et al., (2009)).

#### **V-2-4 -4 Efficience des systèmes d'irrigation**

##### **V-2-4 -4-1 Indicateurs d'efficience**

Selon plusieurs auteurs (Bouaziz A. et al., (2002), Granier J. et Deumier J.M. (2013)), il existe plusieurs termes pour décrire l'efficience des performances d'un système d'irrigation.

##### **V-2-4 -4-2 Efficience de transport**

C'est le volume d'eau disponible au niveau de la parcelle par rapport au volume d'eau prélevé dans la ressource (Granier J. et Deumier J.M., (2013)).

##### **V-2-4 -4-3 Efficience du réseau de distribution de l'eau**

C'est le volume d'eau livré aux prises d'irrigation par le matériel d'irrigation par rapport au volume d'eau prélevé sur les ouvrages principaux (Clément R., et al. (1990)). Les fuites dans le réseau de distribution à la parcelle sont responsables d'une plus ou moins bonne efficience de la distribution (Granier J. et Deumier J.M., (2013)). L'efficience du réseau d'irrigation localisée peut atteindre une valeur potentielle de 95% (Bouaziz. A. et Belabes K. (2002)).

#### **V-2-4 -4-3-1 L'efficience d'application de l'irrigation**

Granier J. et Deumier J.M., (2013), définissent l'efficience d'application de l'eau comme le volume d'eau disponible pour la plante par rapport au volume d'eau fourni par le matériel d'irrigation. Selon Phocaidès A., (2008) l'efficience d'irrigation à la parcelle représente le rapport entre les volumes d'eau effectivement utilisés par les plantes et les volumes livrés en tête de parcelle. Clément R., et al., (1990) ont proposé des ordres de grandeur de 40 à 80% et 65 à 85% respectivement pour l'irrigation de surface et l'irrigation par aspersion. L'efficience d'application est définie comme suit :

$$Ea = (W_s / W_d) * 100$$

- $W_s$ : Quantité d'eau retenue dans le sol au niveau de la zone racinaire

( $W_s \leq SWD$ , SWD étant la réserve stockable dans la zone racinaire au moment de l'irrigation, Hanafi S., (2011).

- $W_d$ : Quantité d'eau apportée sur le champ lors de l'irrigation. (Hanafi S., (2011, Hedi Ben Ali et al. (2014), Vermeiren L., 1983, Phocaidès A., (2008), Bouaziz A. et Belabes K., (2002), Granier et Deumier, (2013).

L'efficience à la parcelle du réseau d'irrigation localisée peut atteindre une valeur potentielle de 95% (Bouaziz A. et Belabes K. (2002)). Une efficience d'application de l'eau d'un système d'irrigation goutte à goutte de 95% est un critère raisonnable de conception d'une installation d'irrigation localisée. Cette efficience est atteinte si la variation en pression est de 20% pour les goutteurs à long cheminement en spirale et de 30% pour les goutteurs à orifice (Abouatallah A., (2013)).

#### **V-2-4 -4-3-2 Efficience globale**

Clément R., et al. (1990), ont rapporté que l'efficience globale d'un système d'irrigation résulte des rendements en cascade qui affectent le transport, la distribution et l'irrigation. Selon un rapport de la société SCET-SCOM/ INGEMA, (2009), en irrigation localisée, l'efficience globale ( $E_g$ ) appelée aussi rendement hydraulique de l'irrigation localisée est définie comme étant le produit entre l'efficience d'application de l'irrigation ( $E_a$ ) et le Coefficient d'Uniformité d'arrosage (CU) :

$$E_g = E_a \times CU$$

Bouaziz A. et Belabes K. (2002), ont rapporté que le système d'irrigation goutte à goutte présente une efficience globale de 90% (valeur potentielle) contrairement au système d'irrigation gravitaire dont l'efficience globale est de 40% avec une valeur potentielle pouvant

atteindre 60%). Laiti A. et al. (2004), ont rapporté qu'une étude réalisée par la CIID (La Haye, en 1993) montre qu'au niveau mondiale le rendement hydraulique global d'un système irrigué est de 28%, avec un rendement au champ de seulement 40%. Ces chiffres font apparaître l'importance des pertes à la parcelle en fonction des techniques d'irrigation utilisées, l'adéquation entre les besoins et les apports et la qualité des installations et du matériel.

### **VI-3 Diagnostic de la performance agronomique**

#### **VI-3-1- Le rendement**

Le rendement est conçu comme l'un des indicateurs importants, pour l'évaluation de la performance agronomique (Hanafi, (2011)). Au Tadla, le système d'irrigation représente un facteur très important qui influence d'une façon significative les rendements des cultures. L'irrigation localisée a induit une augmentation des rendements par rapport au gravitaire. Ainsi, les rendements ont passé de 55 q/ha, 17.7 t/ha, et 62 t/ha à (60 à 70 q/ha), (50 à 60t/ha) et (85 à 95 t/ha) respectivement pour les céréales, la luzerne et la betterave à sucre (Ammari O. et Bayali N., (2016)). Au Tadla, et sous irrigation localisée, la totalité des cultures ont connu une augmentation des rendements après la reconversion à l'irrigation localisée (+33% et +30.1% respectivement pour le blé et la betterave à sucre, Laguig S, (2014).

#### **VI-3-2 Notion d'efficacité d'utilisation et de Productivité de l'eau**

La productivité de l'eau d'irrigation diffère de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Elle indique la marge d'amélioration des rendements par rapport à l'eau allouée à la transpiration ; la première intègre la deuxième (Hanafi, (2011)). Pour éviter toutes confusions, le terme productivité de l'eau doit être utilisé pour désigner la quantité de produit par une quantité d'eau utilisée, consommée ou non consommée par les cultures (Pereira et al. 2011 cité par Ammari O. et Bayali N. (2016).

##### **VI-3-2-1 Efficacité d'Utilisation de l'Eau**

Donkora K. et al, (2014), ont rapporté que l'efficacité de l'eau est un indicateur utilisé pour rendre compte des pertes en eau qui surviennent au cours de son usage. Selon Pereira et al., (2011) cités par Ammari O. et Bayali N. (2016), Bouaziz A. et Belabes K. (2002) ; le terme Efficacité d'Utilisation de l'Eau (WUE ou EUE) est définie par le rapport du rendement à l'eau consommée par la culture, c'est-à-dire l'évapotranspiration réelle (ETR).

$$\text{EUE (kg/mm/Ha)} = (\text{Rdt/ETR})$$

Où :

Rdt : rendement de la culture (en matière sèche totale ou la partie récoltable)

ETR : l'évapotranspiration réelle de la culture

Ammari O. et Bayali N. (2016) ont révélé dans la zone de la reconversion collective à l'irrigation localisée au Tadla que l'efficacité agronomique de l'eau d'irrigation (E.U.E) varie d'un agriculteur à l'autre et d'une culture à l'autre en fonction des quantités d'eau apportées ainsi que les rendements réalisés pour chaque culture. L'E.U. E est de l'ordre de 1, (2 à 13), (7 à 8) et 5 kg/m<sup>3</sup> eau, respectivement pour les céréales, la luzerne, la betterave à sucre et le maïs. Bouaziz et Belabbes (2002) montraient que l'EUE variait de 3,9 kg/m<sup>3</sup> eau à 16,7 kg/m<sup>3</sup> eau à l'échelle du Maroc.

### **VI-3-3 Notion de satisfaction des besoins en eau des cultures**

Il indique le degré de satisfaction ( $T_i$ ) des besoins d'irrigation des cultures mises en place. Il exprime le rapport entre le volume d'eau d'irrigation apporté à l'exploitation par les besoins en eau bruts des différentes cultures de l'exploitation sur la période considérée (Bouazama B. et Bahri A., (2007, El Amri A. et al., (2014), Douzi J. et Jorti A., (2015) et Ammari O. et Bayali N., (2016).

$$T_i (\%) = Q/Bi$$

Avec : Q : quantité apportée par l'agriculteur (mm ou m<sup>3</sup>/ha)

Bi : Besoins d'irrigation (mm ou m<sup>3</sup>/ha)

Ammari O. et Bayali N., (2016), ont montré que la plupart des exploitations étudiées au Tadla connaissent des sur-irrigations (taux de satisfaction des besoins en eau des cultures dépasse 100%), puisque l'agriculteur conserve encore l'esprit du gravitaire. De leur côté El Amri A. et al., (2014), dans une étude sur l'évaluation de l'efficacité hydraulique et agronomique de l'eau d'irrigation au niveau du gouvernorat de Kairouan, ont trouvé des taux de satisfaction des besoins en eau des cultures de l'ordre de 85%. Benouniche M. et al., (2014) ont conclu que les sur-irrigations dans la plaine du Saïs sont expliquées par une mauvaise distribution de l'eau à la parcelle (due à la conception du réseau et des problèmes d'entretien) et une ambition d'avoir d'excellents rendements.

#### **VI-4 Concept de la performance agro-économique**

Selon Bouaziz A. et Belabbes K. (2002), les agroéconomistes définissent et calculent à partir des fiches de conduite techniques et économique des cultures les termes suivants :

##### **VI-4-1 Le Produit Brut par hectare (PB)**

C'est le rendement à l'hectare multiplié par le prix unitaire. Il peut s'écrire :

$$\mathbf{PB = Rdt * PU}$$

(Ammari O. et Bayali N., (2016))

##### **VI-4-2 La Valeur Ajoutée par hectare (VA)**

Elle correspond à la différence entre le produit brut par hectare (PB) et les charges à l'hectare (CHfm) de fournitures (intrants : semences, engrais, pesticides...) et de matériel agricole (location de tracteur et du matériel agricole lors des travaux, moissonneuse-batteuse...). Ainsi on peut écrire :

$$\mathbf{VA (Dh/ha) = PB - CHfm}$$

(Ammari O. et Bayali N., (2016))

Les premiers résultats obtenus en matière de valeur ajoutée dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla sont très prometteurs (gain de 24 à 54 %) comparé à celle obtenue avec l'ancien système d'irrigation.

##### **VI-4-3 La Marge brute**

Bouaziz A. et Belabbes K. (2002) ont rapporté que Certains agroéconomistes préfèrent raisonner en termes de Marge Brute (MB) des cultures par hectare ou en dirhams de Marge Brute par m<sup>3</sup>d'eau.

$$\mathbf{MB (Dh/ha) = Produit brut - Total des charges}$$

Au Tadla, Filali Z., en 2008 a déduit que le passage à l'irrigation localisée a engendré une augmentation de la marge brute dégagée par hectare et de la marge totale dégagée à l'échelle de l'exploitation, puisque l'irrigation localisée permet une augmentation du rendement et donc une augmentation du produit brut et d'autre part une diminution des charges suite au gain en matière de main d'œuvre nécessaire au poste irrigation. Ammari O. et Bayali N. en 2016 ont montré au périmètre irrigué du Tadla dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée que le passage à l'irrigation localisée a engendré une augmentation de la

marge brute dégagée par hectare et de la marge totale dégagée à l'échelle de l'exploitation (augmentation du rendement et donc une augmentation du produit brut et d'autre part une diminution des charges dues essentiellement à l'élimination des charges de la main d'œuvre).

#### **VI-4-4 La valorisation du m<sup>3</sup> d'eau d'irrigation**

Laguig, (2014) a rapporté que le terme valorisation du m<sup>3</sup> d'eau varie selon la discipline. En agronomie, elle est mesurée par le rendement maximal que l'agriculteur réalise en utilisant un m<sup>3</sup> d'eau, tandis qu'en agroéconomie, elle mesure l'amélioration de la richesse générée par l'utilisation d'un mètre cube d'eau. Selon Bouaziz et Belabbes, (2002), le calcul de la valorisation économique de l'eau se fait de deux façons, soit le calcul du rapport entre le produit brut et la quantité d'eau utilisée pendant tout le cycle de la culture (Dh/m<sup>3</sup>), ou bien le calcul du ratio entre le produit brut et le coût total d'eau d'irrigation utilisée pendant tout le cycle de la culture et ce, dans le cas où les tarifs de l'eau sont connus et différents d'un mode d'irrigation à l'autre. Au Tadla, Laguig (2014) a montré que la valorisation de l'eau diffère d'un système de culture à un autre. Le sous-système agrumes a réalisé une valorisation de 10.41 Dh/m<sup>3</sup>, alors que le sous-système maïs-blé a enregistré une faible valorisation par rapport aux autres systèmes avec 2.17 Dh/m<sup>3</sup>. La valorisation des autres sous-systèmes de culture a varié de : 2 à 6 Dh/ m<sup>3</sup> : betterave-melon (5.71 Dh/ m<sup>3</sup>), betterave-niora (5.76Dh/ m<sup>3</sup>), betterave-tomate (4.78 Dh/ m<sup>3</sup>), betterave-oignon (4.10 Dh/ m<sup>3</sup>), blé-betterave (3.49 Dh/ m<sup>3</sup>), maïs-oignon (2.81 Dh/ m<sup>3</sup>), et le système luzernier (2.31 Dh/ m<sup>3</sup>).

#### **VI-4-5 Ratio coût-bénéfice**

Harbouze R. et al., (2009), définissent ce ratio comme efficience économique et l'expriment de la manière suivante :

$$E_k = \frac{\sum \text{pondérée des outputs}}{\sum \text{pondérée des inputs}}$$

Et montrent qu'il y a une certaine cohérence entre les niveaux d'efficience des exploitations et le rapport produits / inputs. L'étude menée par Ammari O. et Bayali N. en 2016 au périmètre irrigué du Tadla, dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée, a montré que ce ratio est égal à 2 chez les exploitations étudiées et pour la majorité des cultures, ce qui signifie que l'agriculteur a gagné un bénéfice net égal aux charges de production dépensées.

## **VII- Le pilotage et la gestion de l'irrigation**

### **VII-1 Introduction**

Lorsqu'une exploitation est correctement équipée en matériel d'irrigation, l'agriculteur doit décider quotidiennement quand, où, et combien irriguer. Le pilotage de l'irrigation vise à ajuster les apports d'eau au strict nécessaire, pour assurer les objectifs en réduisant les nuisances (Combres J.C. et LeMezo L. (1999)).

Le pilotage de l'irrigation est l'acte de déclencher une irrigation à un moment déterminé. Il concerne l'agriculteur en vue d'appliquer une irrigation de telle façon que la plante ne souffre pas d'un déficit hydrique qui peut réduire le rendement ou la qualité de la récolte, et sans qu'il y ait une perte ou un gaspillage de l'eau d'irrigation (Bekraoui, 1999 cité par Douzi A. et Jorti J. (2014)). L'eau d'irrigation est appliquée aux cultures selon des programmes prédéterminés, basés sur l'état hydrique du sol ; les besoins en eau des cultures, le type de sol et les conditions climatiques. D'autres éléments importants doivent être aussi considérés, tels que la tolérance des plantes et la sensibilité au déficit en eau à différents stades de croissance, ainsi que l'utilisation optimale de l'eau (Phocaidès A., (2008)). Idéalement, les cultures devraient être irriguées lorsque la réserve en eau du sol est trop faible pour maintenir celle de la plante à un niveau élevé permettant une meilleure croissance et une bonne productivité. En pratique, les irrigations devraient être apportées avant la manifestation des déficits hydriques du sol (Campbell et al., 1982 cités par Jorti J. et Douzi A. (2014)). Trois méthodes sont utilisées pour le pilotage de l'irrigation. Il s'agit de mesures directes au niveau de la plante (variation de diamètre, température de surface, flux de sève), ou au niveau du sol (humidité ou potentiel), la troisième voie étant la simulation du bilan hydrique (Combres J.C. et Le Mezo L., (1999)).

### **VII-2 Calcul des besoins en eau d'irrigation**

Selon Gosselin L. et al., (2006), le besoin d'irrigation varie grandement en fonction de plusieurs facteurs notamment le type de sol, la pluviométrie, la température de l'air, l'ensoleillement, le stade de croissance de la plante, l'humidité du sol en profondeur, etc. Phocaidès A. (2008) dans son manuel sur les techniques d'irrigation sous pression a mis en exergue les critères et les considérations dont il faut tenir compte lors de la conception d'un projet d'irrigation localisée. Le facteur topographique et le type de sol a été soulevé en rapportant que les terrains quasi horizontaux ou avec des pentes uniformes inférieures à 0.5 % sont recommandés pour ce type d'irrigation. Le sol peut être de n'importe quelle texture, de préférence moyenne et/ou fine, avec un taux d'infiltration inférieur à 20 mm/h. Des sols sableux très légers avec une perméabilité élevée ne sont pas recommandés.



Ammari O. et Bayali N. (2016) ont rapporté que le pilotage de l'irrigation se base sur la connaissance des besoins en eau d'irrigation de la culture. Les besoins en eau d'irrigation se définissent comme la différence entre les besoins en eau des cultures et les fournitures naturelles en eau, pluies pendant la période végétative et l'eau mise en réserve dans le sol pendant la période hivernale. Lidon B. et al., (1999) a précisé que le besoin en eau d'irrigation pour une période est donné par le bilan hydrique comme suit :

$$I = ETc - Pe - \Delta S - Rc + D$$

Avec :  $ETc = ET^o \times Kc$

**I** : Besoin en eau d'irrigation,

**ETc ou ETM** : Evapotranspiration culture ou Maximale

**ETo** : Evapotranspiration de référence,

**Pe** : Pluie efficace

**Pe = 0.8 × P si P < 75 mm/mois ; Pe = 0.6 × P si P > 75 mm/mois** (Phocaidés A., (2008))

**ΔS** : variation de stock d'eau du réservoir sol

**Rc** : remontées capillaires à partir des couches profondes du sol

**D** : Drainage vers la zone située sous la zone racinaire.

Le bilan hydrique constitue le seul outil permettant de réaliser des prévisions (Tron et al. 2000 cité par Ammari O. et Bayali N., (2016)). Dans un système d'irrigation localisée bien dimensionné, les pertes d'eau par percolation et celles causées par les fuites aux prises d'eau ou le long des conduites sont négligeables. Les seules pertes qu'il faut considérer sont dues à la perte de pression le long des rampes. Elles sont inévitables (le taux de perte est estimé approximativement à 1/3 de celui de la variation des débits (Abouatallah A., (2013))). Au Tadla, l'estimation des besoins en eau des différentes espèces pratiquées selon une approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith a montré que les besoins nets diffèrent d'une culture à l'autre. Les valeurs enregistrées sont de 4426, 12415, 2940, 5529, 2087, 3294, 5560, 5553, 5181, 3584, 1992, 8052, 5776 et 5776 m<sup>3</sup>/ha/cycle respectivement pour la niora, la luzerne, l'olivier, le petit pois, la betterave à sucre, la fève, l'oignon, le chou-fleur, le maïs, la pomme de terre, la menthe et le mandarinier/oranger. La variation des besoins bruts des mêmes cultures d'une exploitation à l'autre, est due principalement à la différence des efficacités d'application d'eau d'irrigation entre propriétés (Ammari O. et Bayali N. en 2016).

### **VII-3 Les techniques de pilotage d'irrigation**

#### **VII-3-1 Le pilotage basé sur le bilan hydrique**

D'après Lidon B. et al., (1999), le calcul du bilan hydrique permet de déterminer, au pas de temps journalier, l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture à partir de l'équation générale du bilan de volume entre les apports (pluies efficaces, dose d'irrigation infiltrée...), les sorties (évapotranspiration et pertes par percolation), et la lame d'eau stockée dans le sol.

Le bilan hydrique est estimé selon l'équation suivante :

$$\Delta S = \text{Gains} - \text{Pertes}$$

Selon Tron G. et al., (2000), le besoin en eau d'irrigation pour une période donnée est défini comme suit :

$$I = ET_c - P_e - \Delta S - R_c (+D)$$

Avec :

- **I** : besoin en eau d'irrigation ;

- **ET<sub>c</sub>** : Evapotranspiration souhaitée pour la culture (Evapotranspiration Maximale. En irrigation localisée, elle est calculée comme suit :

$$ET_c = ET^o \times K_c \times K_r$$

- **K<sub>c</sub>**: Coefficient cultural qui dépend de la surface de la feuille de la plante, de sa rugosité, de son stade de croissance, de la saison culturale et les conditions météorologiques.

- **K<sub>r</sub>** : Coefficient de réduction qui dépend du taux de couverture du sol par la culture (C<sub>s</sub>) :

$$K_r = C_s / 0.85 \text{ (FAO, (1983), Keller et Karmeli, Bulletin FAO 36).}$$

$$K_r = C_s \times 1.15 \text{ (Phocaidés A., (2008))}$$

- **P<sub>e</sub>** : la pluie efficace représente la fraction de l'eau de pluie qui reste à la disposition des racines après infiltration. L'irrigation s'impose lorsque l'ET<sub>0</sub> dépasse la pluie efficace ;

- **ΔS**: variation de stock d'eau du réservoir sol ;

- **R<sub>c</sub>** : Remontées capillaires à partir de la nappe ou des couches du sol situées au-dessous de la zone racinaire ;

- **D** : Drainage en dessous de la zone racinaire.

Si le bilan hydrique est unanimement reconnu comme méthode de référence, il n'est pourtant pas exempt de critiques, inhérentes à tout modèle de prévision. Les paramètres d'entrée doivent être connus avec une bonne précision (Lidon B. et al., (1999), Tron G. et al., (2000)).

## **VII-3-2 Le pilotage fondé sur le Contrôle du statut hydrique du sol**

### **VII-3-2-1 Introduction**

La maîtrise de l'irrigation au niveau de la parcelle peut s'appuyer sur le contrôle de l'état hydrique du sol. Ce mode de conduite développé depuis plusieurs années reste indispensable pour fournir des références sur l'utilisation de l'eau du sol (Balas B et al., (1995)). La surveillance de l'humidité du sol est la clé pour apporter la bonne quantité d'eau aux cultures, au bon moment et appliquer l'eau et les éléments nutritifs de manière efficace. (Rebecca S. et Anne Pam F., (2011)). La prise de relevé durant et après une opération d'irrigation a pour but de vérifier si la bonne quantité d'eau a été appliquée. Les capteurs d'humidité sont placés en un point représentatif du champ et à un endroit où les racines sont denses. Dans le cas de l'irrigation goutte à goutte, ces instruments de mesure sont placés à mi-chemin entre le goutteur et la limite extérieure (là où les racines sont denses) du front d'humectation (Rebecca S. et Anne Pam F., (2011)). La méthode du bilan hydrique constitue un Gain d'efficacité par rapport aux méthodes subjectives comme le toucher du sol. Peu importe la méthode utilisée pour gérer les apports en eau par l'irrigation, une caractérisation des propriétés physiques du sol est essentielle (Vallée, J. et al., (2014)). L'état hydrique du sol s'apprécie par deux caractéristiques :

- La teneur en eau, très utilisée depuis longtemps pour le bilan hydrique,
- Les forces de liaison entre l'eau et le sol, exprimées par le potentiel matriciel ou tension (Balas B et al., (1995)).

### **VII-3-2-2 La mesure de la teneur en eau du sol**

L'irrigation goutte à goutte est une technique qui offre de nombreux avantages, mais exige en contrepartie une excellente régie d'irrigation. Dans l'apprentissage de ce type d'irrigation, c'est souvent les mêmes questions qui se posent : quand et pendant combien de temps irriguer ? L'analyse du mouvement de l'eau dans le sol et l'utilisation d'outils de régie adaptés ont permis de répondre à ces interrogations (Gosselin L. et al., (2006)). La mesure de la teneur en eau, ne délivre pas directement une appréciation de la disponibilité de l'eau pour les racines. En effet, selon le type de sol, une même teneur en eau peut correspondre à des disponibilités très différentes pour la culture (Boyer, (2012) cité par Douzi. J et Jorti A., (2015)). On peut distinguer deux types de méthodes permettant de mesurer la teneur en eau du sol (Balas B et al., (1995)) : méthodes fondées sur des prélèvements d'échantillons et celles réalisées dans le sol en place.

### **VII-3-3 Méthodes fondées sur des prélèvements d'échantillons**

D'après Balas B et al., (1995), ces méthodes permettent d'obtenir des teneurs en eau pondérales. La méthode la plus utilisée est la méthode gravimétrique, qui consiste à peser les échantillons avant et après séchage pendant vingt-quatre heures à 105°C. Cependant ces méthodes présentent de nombreux inconvénients ; elles sont destructrices, lourdes à pratiquer et perturbant le milieu analysé (piétinement). Toutefois, la méthode gravimétrique reste la méthode de référence pour l'étalonnage des autres modes de mesure en place.

#### **VII-3-3-1 Mesures dans le sol en place**

Plusieurs méthodes sont disponibles pour procéder aux mesures dans le sol en place. Sous réserve d'un étalonnage, elles permettent d'obtenir la teneur en eau volumique du sol. Une sonde capacitive par site homogène mesure la teneur en eau du sol sur plusieurs profondeurs. Il est ainsi possible de connaître le stock d'eau (en mm) sur la profondeur de sol explorée par la sonde. La pose est délicate car il faut assurer un contact sol – sonde. On installe une conduite d'accès imperméable à l'eau dans laquelle on insère la sonde. De nombreux points de mesure d'humidité peuvent être fixés le long de la sonde pour obtenir des lectures à différentes profondeurs, selon la profondeur d'enracinement des cultures. Il faut les installer tôt en saison afin de définir la capacité au champ et les étalonner (Balas B et al. (1995)). L'appareil la plus utilisée pour la mesure de l'humidité du sol est la sonde capacitive. Le principe de la sonde est d'introduire dans le sol deux tiges métalliques qui constituent un condensateur qui est relié à une bobine de self –induction. L'appareillage mesure la capacité électrique du sol. La mesure de la fréquence de résonance d'une onde électromagnétique est réalisée par capteur sur 10 cm de hauteur (Boyer, 2012 cité par Douzi J. et Jorti A., (2015)). Pour le pilotage de l'irrigation, la sonde a besoin d'une calibration selon le type de sol. La sonde capacitive type Aqua check semi mobile avec un data logger et le logiciel crop-Graph est un instrument de mesure utilisé pour suivre l'humidité du sol sur place. Un seul data logger mobile peut collecter les données automatiquement par télémétrie à courte portée (10 m). Chaque sonde offre un maximum de six profondeurs sur 60 cm de profondeur (10, 20, 30, 40,50, et 60 cm). Sur chaque horizon du sol, deux données sont disponibles : l'humidité du sol en pourcentage volumique de l'eau dans le sol et la température du sol. Le principe de fonctionnement de ces sondes consiste en la mesure de la vitesse des ondes électromagnétiques qui sont ralenties par l'humidité du sol. Ces instruments sont étalonnés par le fabricant, mais comme la texture du sol influence la vitesse des ondes, ces appareils nécessitent un réétalonnage dans le site où ils sont implantés par des mesures d'humidité in situ moyennant la méthode gravimétrique (Green solution (2013)).

Les sondes capacitives du leader mondial Aqua Check mesurent l'humidité et la température du sol simultanément tous les 10 cm de profondeur. Un capteur capacitif envoie un courant électrique dans un volume de sol qui l'entoure pour en mesurer son taux d'humidité (mesure de la permittivité diélectrique du sol). A la différence d'autres types de capteurs qui ne mesurent l'humidité que par leur surface de contact avec le sol, les capteurs capacitifs mesurent l'humidité dans un volume de sol, ce qui est beaucoup plus significatif. Enfin, si un capteur capacitif mesure un seul volume, une sonde capacitive à profil, mesure un volume de sol sur toute sa profondeur ([http://C:/Users/Admin/Desktop/Sondes % 20 capacitives %20 Aqua Check %20 pour %2 0piloter%20l'irrigation%20-%20Corhize .pdf](http://C:/Users/Admin/Desktop/Sondes%20capacitives%20Aqua%20Check%20pour%20piloter%20l'irrigation%20-%20Corhize.pdf)).

### **VII-3-3-2 Le pilotage basé sur le climat**

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région. Plusieurs formules sont utilisées au Maroc pour l'évaluation de l'évapotranspiration. Ces approches empiriques nécessitent l'acquisition des données climatiques relevées par des stations météorologiques normalisées. Selon Richard G. et al., (1989), la formule de Penman Monteith tenant compte des paramètres aérodynamiques a donné les meilleures estimations de l'évapotranspiration en comparaison aux sites lysimétrique. Le développement des relations pour la canopée et la résistance aérodynamique en fonction de la hauteur de la culture de référence a permis l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith en mode opérationnel et une meilleure transférabilité de cette forme de résistance à une grande variété de climat.

#### **VII-3-3-2-1 Formule de Penman- Monteith (FAO)**

C'est la méthode actuellement recommandée pour l'estimation de l'ET<sub>0</sub>. Elle se distingue par son origine théorique dérivée du bilan des flux énergétiques à la surface du couvert végétal. La FAO a adapté la formule de Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence ou ET<sub>0</sub> (Allen et al., (1994)). La validité de cette formule dans différents contextes climatiques marocains a été rapportée par plusieurs auteurs (Belabbes et Chati 1996 cité par belabbes K. (2004), Bouaziz A. et Belabbes (2002)). Elle s'écrit de la manière suivante :

$$ET^{\circ} = 1 \Delta + \gamma * (1 + 0.34 * U_2) (0.408 \Delta R_n + \gamma 900 T + 273 U_2 (e_a - e_d))$$

Avec :

**ET<sup>°</sup>** : Evapotranspiration de référence journalière (mm/j); **R<sub>n</sub>** : Rayonnement net (106 joules/m<sup>2</sup>); **T** : Température moyenne journalière en (°C); **U<sub>2</sub>** : Vitesse moyenne journalière du

vent mesurée à 2 mètres (m/s);  $e_a$  : Pression de vapeur d'eau à la saturation à la température  $T$  (kPa);  $e_d$  : Pression de vapeur moyenne journalière (kPa);  $\Delta$  : Pente de la courbe de pression saturante à la température  $T$  en (kPa/°C);  $\gamma$  : Constante psychrométrique (kPa /°C).

## **IIIX- Changements engendrés par la reconversion collective**

Les paramètres évalués concernent essentiellement :

### **IIIX-1 Les rendements**

Les premiers résultats obtenus en matière de rendement pour les principales spéculations pratiquées dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla sont très prometteurs (augmentation de 31 à 56%) comparé à ceux obtenus avec l'ancien système d'irrigation (ORMVAT, (2016 c)). L'irrigation au goutte à goutte a permis une production 2.8 fois plus que celle réalisée sur la parcelle irriguée à la raie (Zyani K., et al., (2000)).

### **IIIX -2 L'économie de l'eau d'irrigation**

Dans un contexte hydrique aussi tendu, le concept d'économie d'eau revêt un caractère particulier. La sauvegarde de ces périmètres d'irrigation passe non seulement par l'adoption des techniques d'irrigation les plus économes en eau mais surtout par le développement des systèmes de mise en valeur agricoles qui valorisent au mieux les ressources en eau limitées (Belghiti, (2009)). Les premiers résultats obtenus en matière de consommation en eau pour les principales spéculations pratiquées dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla sont très prometteurs (économie de 36 à 40% d'eau) comparé à l'ancien système d'irrigation (ORMVAT, (2016c)). Selon une étude d'évaluation de l'impact économique de la politique de reconversion des systèmes d'irrigation gravitaires en système d'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla dans la zone des Beni Moussa, les rendements des spéculations atteindront leurs maximums tout en utilisant des quantités d'eau moindres par rapport aux quantités utilisées en système d'irrigation gravitaire (Mengoub F.Z et al., (2014)). L'atteinte des objectifs d'économie et de valorisation de l'eau nécessite la formation des agriculteurs à la maîtrise de l'irrigation au goutte à goutte (Saltani A. et al., (2004)). Le goutte à goutte conduit sur les grandes cultures peut engendrer des économies d'eau de 5 à 15 % (jusqu'à 20 % selon les conditions pédoclimatiques, Gabriel H., (2014)). Par ailleurs, des situations dans lesquelles la consommation en eau à l'hectare a augmenté avec des

techniques d'irrigation localisée, en raison d'une mauvaise maîtrise technique ont été constatées (Fusillier et Saque, 2001 cité par Petitguyot T. et al., (2005)).

### **II X -3 Utilisation des eaux souterraines**

Dionnet M. et al., (2006) ont rapporté que la situation environnementale au périmètre irrigué du Tadla est caractérisée par une baisse de la disponibilité de la ressource en eau. Cette pénurie a incité les agriculteurs à un recours massif aux eaux souterraines par pompage. Des études réalisées dans le périmètre du Tadla par Hammani A. et al., en 2005 indiquent qu'il existe un risque environnemental important de baisse de niveau des aquifères. Selon une étude menée par Mengoub F.Z et al., (2014), se proposant l'évaluation de l'impact économique de la politique de reconversion des systèmes d'irrigation gravitaires en système d'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla dans la zone des Beni Moussa en se basant sur un modèle de gestion intégrée de l'eau tenant compte à la fois des composantes agronomiques, hydrologiques et économique de l'eau, ont montré qu'après la reconversion, l'utilisation de l'eau de surface augmentera de 51%, alors que celle des eaux souterraines baissera de 28%. Hammani A., (2015) a rapporté que les apports par irrigation constituent la principale source d'alimentation de la nappe des Beni Moussa représentant ainsi, 71% de la recharge totale. Quant aux sorties, constituées essentiellement par les prélèvements pour l'irrigation par pompage privé, elles sont évaluées à 66%).

### **II X -4 Assolements et intensification culturale**

Les premiers résultats obtenus en matière d'intensification (TIC) et de diversification culturale dans la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla sont très prometteurs comparativement à l'ancienne situation avec le système d'irrigation gravitaire. Le TIC a passé de 98% à 120%, avec un développement et extension des cultures : niora, menthe, sésame et maïs ensilage (source ORMVAT, (2016c)). Selon une étude menée par Mengoub F.Z et al., (2014), au périmètre irrigué du Tadla, l'introduction d'une nouvelle technique d'irrigation affectera énormément les choix de l'agriculteur. On remarque que les céréales et la betterave à sucre verront leurs superficies diminuer respectivement de 20 et 37 %. Par contre, l'olivier et les autres cultures augmenteront d'environ 42 à 43 % de superficie par rapport à l'année de base. Selon les projections, la superficie des fourrages et les agrumes va augmenter de 13 % et 15 % par rapport à la situation d'avant- projet. Tijani N. et Baala S., (2016) ont montré que la reconversion des systèmes d'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée, n'a pas engendré lors de la première année des changements dans les assolements

pratiqués. Toutefois, une faible tendance vers les cultures à grande valeur ajoutée telles que le maraichage est constatée. De leur part, Bekkar Y. et al., (2007) ont souligné que les changements intervenus dans les exploitations au Tadla ayant installé un projet de goutte à goutte sont en général progressifs mais néanmoins perceptibles dès la première année. Les agriculteurs n'introduisent pas de nouvelles cultures après la reconversion, mais maintiennent ou accentuent l'importance des cultures à haute valeur ajoutée au sein de leurs exploitations.

## **IX - Fiche technique de la betterave à sucre**

### **IX-1 - Position taxonomique de la betterave à sucre**

La betterave à sucre est classée comme une plante dicotylédone, apétale du genre Beta, espèce vulgaris (<http://www.institut-betterave.asso.fr/>). Cette culture de nom scientifique (Beta vulgaris L.) appartient à la famille des Chénopodiacées selon la classification classique ou la famille des Amarantacées selon la classification phylogénétique (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Betterave>).

### **IX-2- Productivité et exigences en eau**

La betterave a besoin de 600 à 700 mm/cycle pour produire 15 à 20 t de matière sèche /ha. Le lit de semence doit avoir une humidité de l'ordre de 20 à 22% pour assurer une bonne germination et levée des semences (Bosemak N.O. <https://www.Oecd.org/fr/sti/biotech/1946188.pdf>). Les besoins de la betterave se situent entre 7000 et 8000 m<sup>3</sup> d'eau/cycle/ha pour des rendements Moyens de 40 t/ha. L'eau peut être apportée par la pluviométrie ou par l'irrigation. Le rationnement en eau pendant la période de la formation racinaire (bouquet foliaire-fin Formation racine = 60 jours) semble le plus préjudiciable au rendement. Le rendement en racine est beaucoup plus affecté par un manque d'eau que le rendement en sucre, en effet, une diminution de la photosynthèse consécutive à la sécheresse se répercute d'abord sur l'élaboration des tissus et, si la sécheresse s'accroît, l'effet atteint le processus d'accumulation du sucre (<http://C:/Users/user/Downloads/53305b8054214.pdf>). En étudiant l'effet de l'irrigation sur la croissance et le rendement qualitatif et quantitatif de la betterave à sucre en zone aride de Jambyl au sud de Kazakhstan, Massatbayer K. et al., (2016) ont rapporté que la culture dans les conditions de l'expérimentation exige 7200 m<sup>3</sup>/ha (720 mm) pour accomplir son cycle convenablement.

### **IX-3- Humidité du sol**

Le lit de semence doit avoir une humidité de l'ordre de 20 à 22% pour assurer une bonne germination et levée des semences (<http://www.institut-betterave.asso.fr/>). Selon Stout et al.,



(1956) cités par Draycott A.P., (1972), le taux d'humidité du sol doit être de 12 à 21%. Veverka K., (1985) a signalé que la graine de la betterave à sucre est très sensible aux fortes humidités au début de la germination.

#### **IX-4 - Tolérance de la culture à la salinité**

Les cultures réagissent différemment à la salinité. Plusieurs facteurs interagissent pour influencer la tolérance en sel des cultures. Il s'agit de la plante, le sol, l'eau, le climat et les pratiques culturales dont la gestion de l'irrigation (Phocaidés A., (2008)). La betterave à sucre résiste bien à la salinité (<http://bacteries-champignons.blogspot.com/2012/>). Le tableau ci-après donne des seuils de tolérance de la betterave à sucre à la salinité en fonction du taux de réduction du rendement et les besoins en eau de lessivage correspondant :

**Tableau 5** : Seuils de tolérance de la betterave à sucre à la salinité

Landreau A. et Monition L., (1977)

	<b>Réduction du rendement de la betterave à sucre (%)</b>				
	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>Max</b>
<b>EC<sub>e</sub> (mhos/cm)</b>	6700	10000	13000	16000	
<b>EC<sub>w</sub> (mhos/cm)</b>	4500	6700	8700	10700	
<b>LR</b>	11	16	21	26	
<b>EC<sub>dw</sub></b>					4400

**EC<sub>e</sub>** : Conductivité du sol (extrait de la pâte saturée),

**EC<sub>w</sub>** : Conductivité de l'eau,

**LR** : Quantité d'eau de lessivage (Leaching Requirement)

$LR = EC_w / EC_{dw}$ , **EC<sub>dw</sub>** : Conductivité de l'eau de drainage à l'extrémité du système racinaire.

En étudiant l'effet de la salinité sur la germination des graines et la biomasse des racines, Jami M. et Eul-Shik Rha, (2004) ont rapporté un effet significatif des traitements (témoin, 0,5, 1,0 et 1,5 % de Na Cl) sur la germination des graines de la betterave à sucre et le chou. Le taux de germination diminue avec l'augmentation de la salinité jusqu'à 1,5% Na Cl (la diminution est très marquée chez le chou que chez la betterave à sucre). La croissance est

inhibée par les niveaux de salinité de 1.0 et 1.5 % Na Cl. A 0.5 % Na Cl, la croissance des racines est plus affectée que la croissance des pousses.

La sensibilité des cultures au stress salin se traduit par une réduction du rendement. Le seuil de tolérance à la concentration de sel dans la zone racinaire est propre à chaque culture (Saitter M. et al., (2007), Noomene, H., (2011)). Le plus souvent le seuil de tolérance des cultures est exprimé par la CE de l'extrait de pâte saturée du sol (ECe). Nous remarquons que les cultures maraîchères et arboricoles sont généralement les plus sensibles à la concentration de sel dans la zone racinaire, tandis que les céréales et les cultures fourragères supportent une concentration plus élevée sans perte significative de rendement (Noomene, H., (2011)). Un sol avec une conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée du sol dépassant 4 dS/m est considéré salin (Sanchez C.A. et J.C. Silvertooth, (1996)). Toutefois, certaines cultures horticoles sont négativement affectées si la concentration des sels au niveau de la zone racinaire dépasse 2 dS/m (Sanchez C.A. et Silvertooth J.C, (1996), Saitter M. et al., (2007)). En règle générale, un doublement de la valeur de la CEE entraînera une baisse de production de l'ordre de 50 % (Noomene, H., (2011)). Des cultures de betterave à sucre irriguées par des eaux contenant 0.64 à 14.6 g/l de Na Cl montrent qu'à des concentrations qui dépassent 8.76 g/l le sol présente une accumulation des sels solubles (salinisation) et de sodium (sodisation). La croissance des plantes est significativement affectée suite à l'irrigation des plants par des eaux à une concentration de 11.68 g/l en Na Cl. La betterave à sucre a montré une résistance à la salinité, et si des doses modérées en Na Cl se sont montrées favorables, celle-ci voit sa richesse saccharine diminuer fortement sous stress salin (Aylaji M. et al., (2001)).

#### **IX-5 - Rentabilité de la culture de la betterave à sucre**

La betterave sucrière est une culture à forte marge brute par hectare. Les agriculteurs ont donc tendance à lui réserver les sols de l'exploitation qui présentent les plus fortes potentialités [https://tice.agroparistech.fr /cours en ligne/courses/PHYTOTECHECHNIE/document/phytotechechnie/ pdf/betterave.pdf](https://tice.agroparistech.fr/cours%20en%20ligne/courses/PHYTOTECHECHNIE/document/phytotechechnie/pdf/betterave.pdf) . Betterave sucrière, (2003)) . En évaluant, la faisabilité économique de la mise en œuvre d'une pratique d'irrigation au goutte à goutte sur la betterave à sucre, il a été montré que le rendement en racines et en sucre étaient plus élevés avec le goutte à goutte qu'avec l'irrigation au sillon. Le rendement en sucre valait 2080 et 2310 dollars/ha respectivement pour l'irrigation au sillon et au goutte à goutte (sharmasarkar F.C et al., (2001)). La valeur de la production de la betterave à sucre dépend de la teneur en sucre des racines et le prix de table appliqué. Le revenu brut enregistré est de 2091.55 et 1911.39 Euro/ha pour l'irrigation localisée de surface respectivement pour les régimes d'irrigation 100 et 80% des

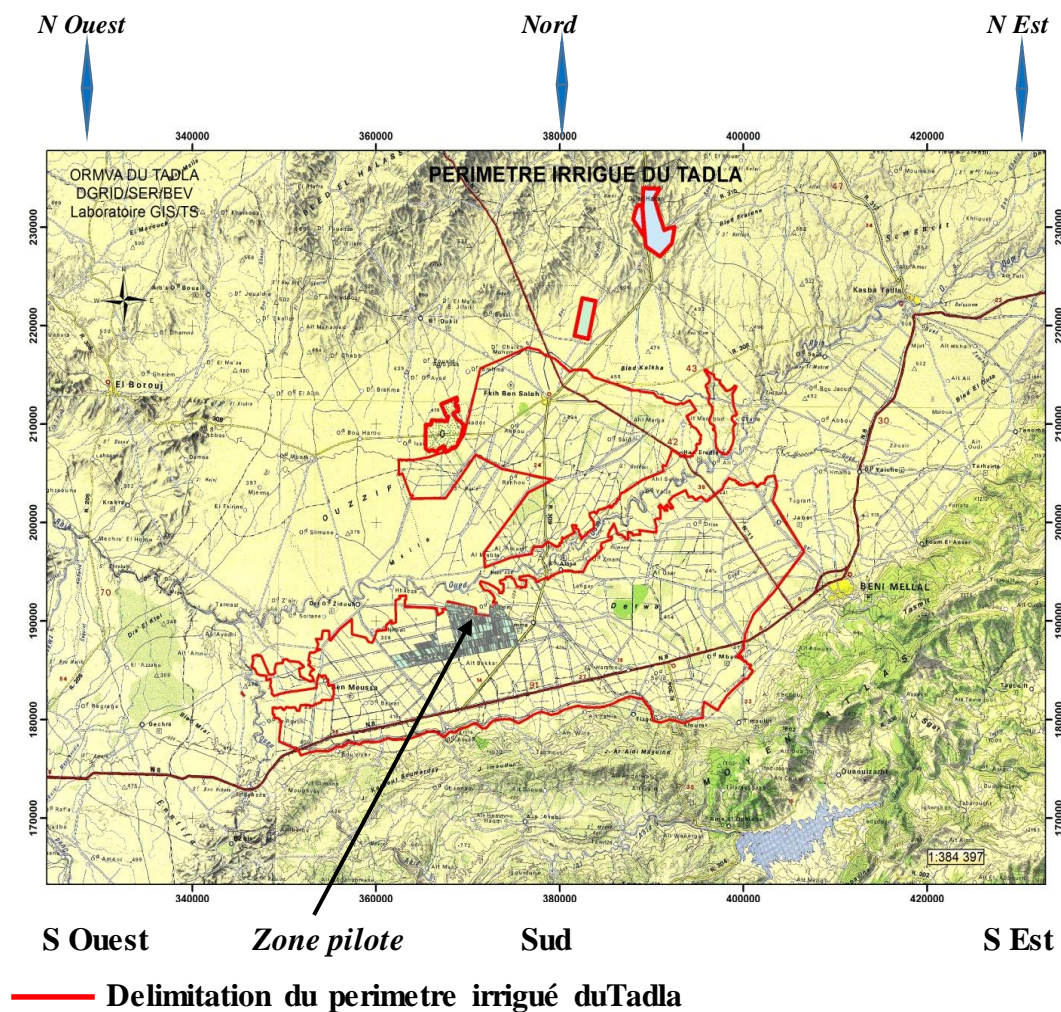
besoins en eau. L'irrigation localisée enterrée a procurée un bénéfice additionnel de 845.75 et 516.81 Euro/ha par rapport à l'irrigation de surface respectivement pour les niveaux d'irrigation 100 et 80% des besoins en eau (Sakellariou-Markantonaki M. et al., (2002)). En étudiant l'effet de différents régimes hydrique sous-système goutte à goutte sur le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation, Topak R. et al., (2011) ont révélé que l'irrigation déficitaire affecte le rendement en passant du régime d'irrigation complète aux régimes d'irrigation restreinte (25, 50 et 75 % du régime complet). D'un point de vue économique, le gain d'eau de 25% (25% du régime complet) a entraîné une réduction de 6.1 % du revenu net.

**CHAPITRE II :**  
**ETUDE DES PERFORMANCES**  
**DE L'IRRIGATION LOCALISEE**

# I- Etude des performances de l'irrigation localisée

## I-1 Présentation de la zone

La présente étude a été menée dans le périmètre irrigué du Tadla, comme illustré sur la carte de localisation ci-après, et précisément au niveau du secteur pilote des Beni Moussa Ouest représentant la première expérience de reconversion collective en grande hydraulique à l'échelle nationale.



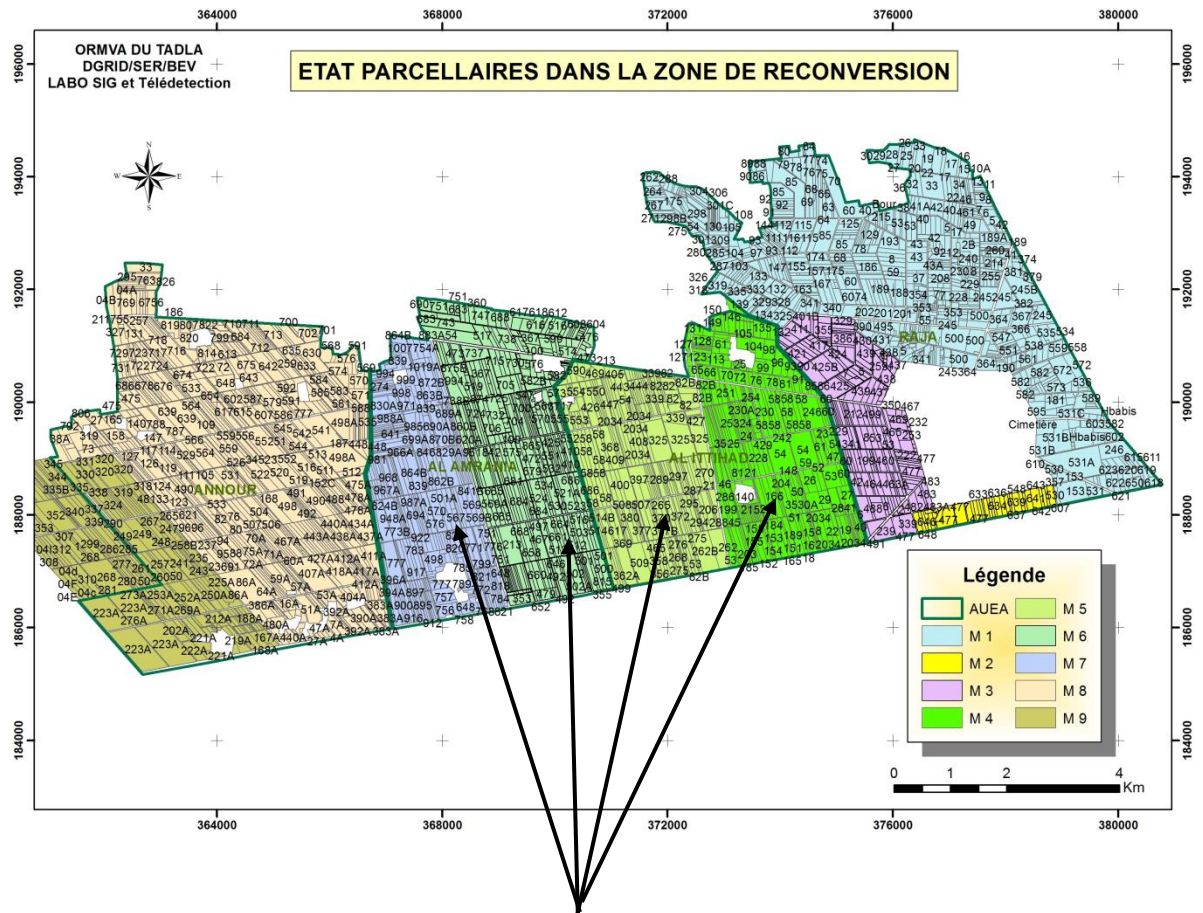
**Figure 4 :** Localisation géographique du périmètre irrigué du Tadla ORMVAT, 2014 cité par Daoudi H. (2016)

Le secteur dont les premières mises en eau ont eu lieu depuis janvier 2015, s'étend sur une superficie de l'ordre de 4 045 ha. Cette zone est représentée comme illustré sur la carte ci-après par deux Associations d'Usagers d'Eau d'Irrigation (AUEA AL ITTIHAD ET AL AMRANIA) relevant de la zone du Centre pilote de Développement Agricole (CDA 536).





essent de cette denrée qui devient de plus en plus rare, d'autre part expliquer et corriger éventuellement les situations où l'on constate de mauvaises performances techniques.



**Figure 6 :** Premiers secteurs de la zone pilote de reconversion collective (M4-M5-M6-M7)  
 Source: internet, (2016), rapportée par Daoudi H., (2016)

Cette étude tente à travers une étude diagnostic de la pratique de l'irrigation et des modes de gestion post projet adoptés par les usagers agricoles de :

- Apprécier le degré d'adaptation des agriculteurs à la nouvelle technique d'irrigation.
- Evaluer les changements et impacts engendrés par la reconversion des systèmes d'irrigation existants.
- Déterminer les performances du réseau d'irrigation localisée mis en place, de point de vue hydraulique et agro-économique.
- Formulation des recommandations pratiques et les perspectives d'avenir permettant de lever progressivement et durablement les facteurs limitants et le respect des principes à la base de la conception de projet.

- Mener une expérimentation au champ sur un facteur limitant qui dégrève la bonne régie des irrigations et en conséquence de quoi la productivité des cultures pratiquées au périmètre irrigué du Tadla.

Cette investigation s'inscrit pleinement dans ce sens et vise un accompagnement du processus de la reconversion collective en procédant d'abord à un diagnostic de fonctionnement et d'analyse des performances hydrauliques et agronomiques des premiers secteurs reconvertis en irrigation localisée pour préciser d'une part si les objectifs de départ du projet consistant à l'amélioration de la productivité et d'autre part la promotion d'une durabilité de l'utilisation de l'eau d'irrigation traduite en terme de limitation de l'exportation de l'eau de la nappe et de valorisation de l'eau d'irrigation sont atteints. Ce travail permettra de dégager en conséquence, les principales contraintes qui s'opposent au développement et à la valorisation des potentialités de cette technique dans la zone et d'évaluer l'impact environnemental et agro économique engendré par l'introduction de cette nouvelle technique d'irrigation.

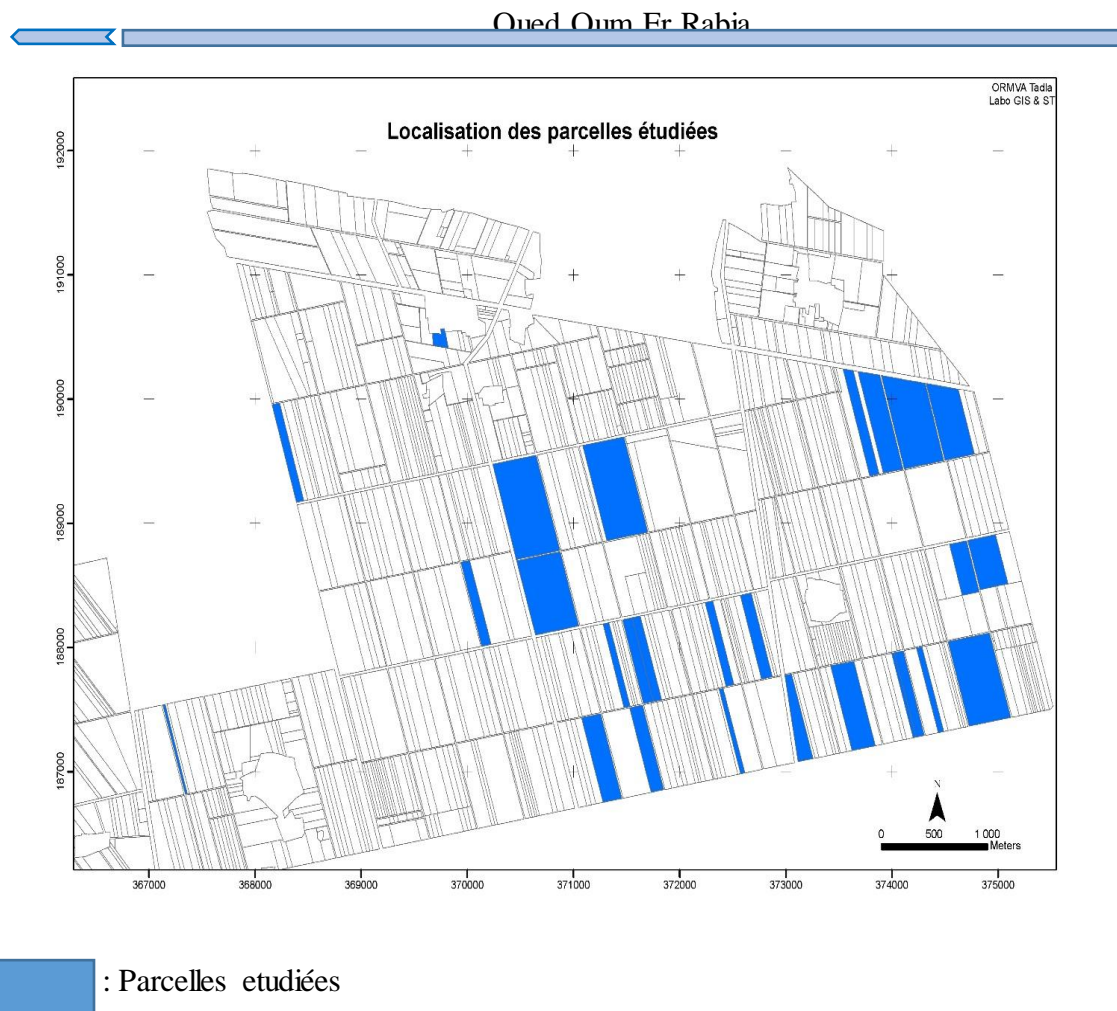


***CHAPITRE III***  
***MATERIELS ET***  
***METHODES :***

### **III- Matériels et Approches méthodologiques**

Le cheminement méthodologique adopté pour parvenir aux objectifs assignés au présent travail, consiste à choisir un échantillon de 32 exploitations éparpillées de manière à refléter la diversité de la zone d'étude. Parallèlement à cette évaluation, une expérimentation sur le pilotage des arrosages d'une culture principale et stratégique de la zone d'étude en l'occurrence la betterave à sucre sera conduite in-situ chez un agriculteur plus réceptif et faisant partie du même échantillon retenu pour l'étude diagnostic. Le matériel et les méthodes adoptés pour cette partie seront détaillés au niveau du chapitre expérimentation.

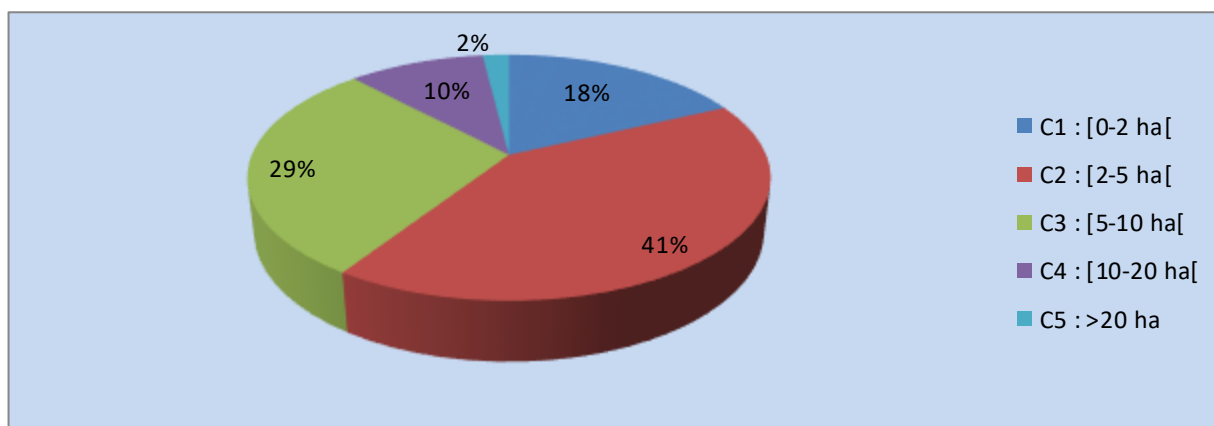
La carte de situation ci-après montre la répartition spatiale des agriculteurs retenus pour cette évaluation des performances de la nouvelle technique d'irrigation introduite au périmètre et son impact tant environnemental qu'agro-économique.



**Figure 7** : Plan de situation des parcelles étudiées au niveau de la Zone pilote (Labo GIS ORMVAT, (2016))

L'échantillon en question englobe des exploitations choisies selon des critères préétablis à savoir :

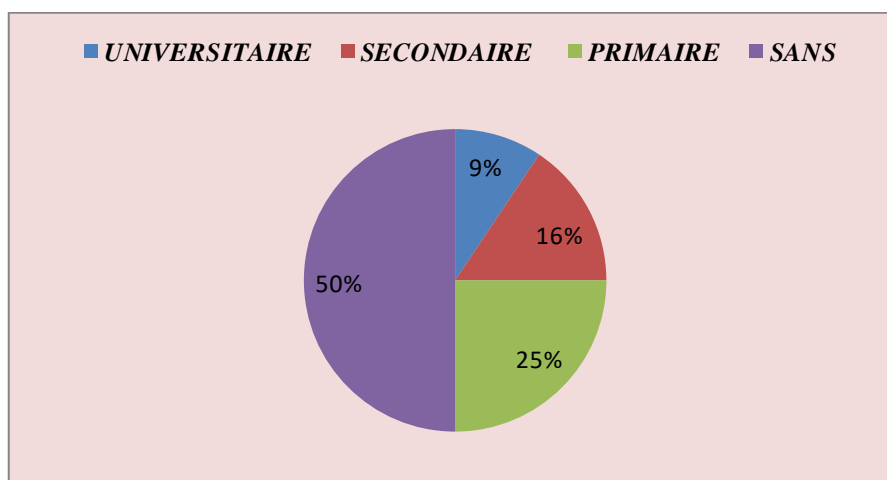
- Taille des exploitations (moyenne, faible, grande)



**Figure 8 : Typologie des exploitations étudiées**

Le graphique ci-dessus illustre la taille des exploitations retenues pour l'étude ainsi que leurs parts en termes de superficie dans l'échantillon global.

- Systèmes de productions existantes (céréalières, fourragères et sucrières). La Betterave à sucre, les céréales et la luzerne, considérés comme cultures principales et tête d'assolement, représentent respectivement 26, 20 et 20 %, soit un total de 66% de l'assolement globale.
- Accessibilité aux propriétés (parcelles limitrophes à un axe routier ou une piste stabilisée)
- Niveau de qualification des propriétaires (toucher tous les niveaux d'instruction : bas, moyen et faible). Le graphique ci-après illustre clairement le niveau des différents exploitants enquêtés.



**Figure 9 : Typologie du niveau d'instruction des exploitants enquêtés.**

Cette étude se propose, à partir d'un ensemble de paramètres de performance, de conduire un diagnostic et une analyse concernant l'exploitation des ressources et des infrastructures hydrauliques, la mise en valeur agricole et la valorisation de l'eau d'irrigation. A cet effet, un questionnaire détaillé en annexe renfermant tous les aspects jugés utiles pour mener au mieux cette évaluation, a été élaboré. Des entretiens et des visites de lieu ont été effectués auprès des irrigants pour collecter les informations et mesurer in situ certains paramètres d'évaluation.

La partie qui suit aborde la méthodologie adoptée pour étudier séparément chaque paramètre retenu pour cette investigation.

### **III-1 Diagnostic du système d'irrigation**

#### **III-1-1 Qualité de l'eau d'irrigation :**

Les données relatives aux analyses des eaux de surface ont été exploitées pour apprécier la qualité de l'eau d'irrigation utilisée par les usagers agricoles. Cette analyse nous permettra de déterminer d'une part si l'eau est de bonne qualité pour assurer une croissance et un développement normal des cultures et d'autres part évaluer les risques potentiels de dégradation de la qualité du sol et de colmatage des distributeurs du système d'irrigation due aux éléments constitutifs de l'eau.

#### **III-1-2 Détermination des besoins en eau des cultures.**

Connaître les besoins en eau des cultures permet de mieux raisonner l'irrigation. L'appréciation des besoins en eau des cultures a été faite selon une approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith estimant l' $ET^o$  en utilisant les données climatiques fournies par la station agro météorologique automatique (M2) installée à cet effet dans la zone d'étude. La validité de cette approche climatique dans la conduite de l'irrigation, trouve son justificatif dans les résultats probants de l'essai (que nous détaillons par la suite dans la partie résultats et discussions) menée chez un agriculteur de la zone d'étude sur une culture de la betterave à sucre.

La quantité d'eau (Q : besoins nets) à restituer par irrigation est calculée de la manière suivante :

$$Q = ET^o \times k_{ci} \times K_r + L_r - P_e$$

Cette quantité sera majorée compte tenu de l'efficacité du système d'irrigation. (Phocaidès A., (2008)).

Avec :

- $E_T$  : Evapotranspiration de référence (en mm/jour)
- $K_{ci}$  : Coefficients culturaux donnés par les tables du Bulletin FAO 36. Il dépend du type de culture et de son stade phénologique (phase initiale, développement, mi saison et arrière-saison).
- $k_r$  : Coefficient de réduction variant avec le taux de couverture du sol par le végétal au cours du cycle ( $C_s$ ) majoré de 15%,

$$K_r = C_s * 1.15 \text{ (Phocaides A., (2008))}$$

**Tableau 6** : Valeurs de  $K_r$  en fonction du taux de couvrir  
Belabbes K. (2013)

Taux de couverture du sol $C_s$ (%)	Kr selon les formules de		
	Keller et karmeli	Freeman et Gazoli	Decroix (CTGRF)
10	0,12	0,1	0,2
20	0,24	0,2	0,3
30	0,35	0,3	0,4
40	0,47	0,4	0,5
50	0,59	0,75	0,6
60	0,7	0,8	0,7
70	0,82	0,85	0,8
80	0,94	0,9	0,9
90	1	0,95	1
100	1	1	1

- $L_r$  : Dose de lessivage (mm) négligeable dans notre cas étant donné que les sols ne présentent actuellement aucun problème de salinité.
- $P_e$  : pluies efficaces (mm):

$$P_e = 0.8 * P \text{ si } P > 75 \text{ mm/mois}$$

$$P_e = 0.6 * P \text{ si } P < 75 \text{ mm/mois (Phocaides A., (2008))}$$

- $P$  : quantité de pluies reçues pendant le cycle cultural.

### **III-1-3 Satisfaction de la demande en eau des cultures**

Ce paramètre indique le degré de satisfaction ( $T_i$ ) des besoins d'irrigation des cultures mises en place durant le cycle cultural. Il est définie comme suit :

$$T_i = Q/B_i$$

Avec : Q : Quantité d'eau apportée par l'agriculteur

$B_i$  : Besoins bruts d'irrigation

Les volumes consommés sont comptabilisés en se basant sur le débit du secteur par exploitation, la durée et la fréquence des irrigations effectuées par chaque propriétaire.

### **III-1-4 Contrôle du débit de l'installation.**

L'étude de modernisation de l'agriculture au périmètre irrigué du Tadla a prévu l'installation au niveau des prises bloc d'un compteur volumétrique individuel par propriété pour suivre les prélèvements de chaque prise parcelle pour des fins de facturation et de contrôle du fonctionnement du réseau.

Les compteurs d'eau peuvent s'avérer avantageux dans toutes les pratiques agricoles où l'eau est utilisée. La surveillance de la consommation d'eau à l'aide d'un compteur permet de :

- Connaître la quantité d'eau utilisée, considérée comme première étape pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau à la ferme.
- Connaître la pluviométrie horaire apportée réellement sur une parcelle lors d'un arrosage
- Connaître le volume d'eau apporté pour l'ensemble de la campagne d'irrigation
- Diagnostiquer lors des lectures instantanées du débit, si le système fonctionne comme prévu et de détecter d'éventuelles obstructions des distributeurs. Deux cas de figure peuvent se présenter :

+ Si le débit est plus élevé que d'habitude, il faut vérifier s'il y a des fuites, des buses usées ou un mauvais fonctionnement des valves,

+ Si le débit est plus faible que prévu, vérifier s'il y a obturation (colmatage progressif des goutteurs) dans le système dus au limonage entraînant une diminution de la section de passage de l'eau dans le cheminement du distributeur. Un bon moyen d'apprécier la baisse des débits due au bouchage des organes de distribution, consiste à mesurer régulièrement en début de campagne agricole, le volume global livré par l'installation pendant une unité de temps (une

heure par exemple) à l'aide d'un compteur volumétrique installé en tête de réseau et de le comparer à la valeur du projet.

Des explications à propos des faibles écarts observés entre les mesures théoriques » et Celles Réelles peuvent être avancées : Si les conditions d'utilisation respectent les Spécifications Fournies par le fabricant, le débit mesuré au champ devrait être le même que celui fourni par le fabricant. Toutefois, des facteurs tels la pression d'opération, le colmatage du filtre ou des goutteurs et l'uniformité d'application de l'eau peuvent être responsables de l'écart qui peut y avoir entre les deux pluviométries. De plus, des modifications au système par le producteur durant la saison, des fuites au niveau du réseau et aussi des erreurs de mesure peuvent expliquer l'écart observé.

Afin d'assurer une bonne uniformité de l'application d'eau au niveau de la parcelle, les variations de débit des distributeurs doivent être minimales, et en aucun cas supérieures à 10%. Ce critère a été établi par Christiansen J. pour les asperseurs, mais est actuellement appliqué à tous les systèmes sous pression (Phocaides A. (2008)).

### **III-1-5 Contrôle de la pression**

Le manomètre comme illustré sur la photo ci-après, est la pièce maitresse utilisée pour contrôler la pression au niveau de l'installation d'irrigation localisée:



**Figure 10** : Manomètre de mesure de pression

Cet instrument de mesure est installé un peu partout dans le circuit d'irrigation pour apprécier entre autres la pression à l'entrée et à la sortie de la borne d'irrigation ( $P_b$ ), la pression à l'entrée de la prise parcelle (PP), la pression à l'entrée de la station de tête, la pression d'entrée et de sortie du matériel d'injection d'engrais, la pression à l'entrée et à la sortie du filtre à tamis, la pression à la sortie de la station de tête, la pression à l'entête de la parcelle, la pression à

différents niveaux des rampes et la pression à l'extrémité des rampes les plus éloignées et défavorisées.

En règle générale, la différence de pression maximale admise entre deux distributeurs qui fonctionnent ne doit pas être supérieure à 20%. Les pressions de fonctionnement requises à certains niveaux de l'installation sont données pour les systèmes sous pression comme suit :

- Pression à l'entrée de la Conduite principale :  $P_m = 1.35 * Pa$
- Pression à l'entête de la conduite latérale :  $P_n = 1.15 * Pa$
- Pression au sortir du distributeur :  $Pa = 1.00 \text{ bar}$
- Pression en fin de rampe  $P_o = 0.95 \text{ bar}$

Phocaide A. (2008)

### **III-1-6 Uniformité de la distribution**

#### **III-1-6-1 Coefficient d'Uniformité d'arrosage**

Selon Benouniche et al, 2014, le coefficient d'uniformité de la distribution (C.U) représente la capacité de l'installation à fournir la même dose d'irrigation à l'ensemble d'une parcelle. A plus de 90%, l'uniformité est considérée excellente ; plus elle est basse, plus il y a des problèmes de distribution (bouchage des goutteurs par exemple). Le CU relève de l'état du matériel et parfois de la conception ainsi que de l'entretien du réseau.

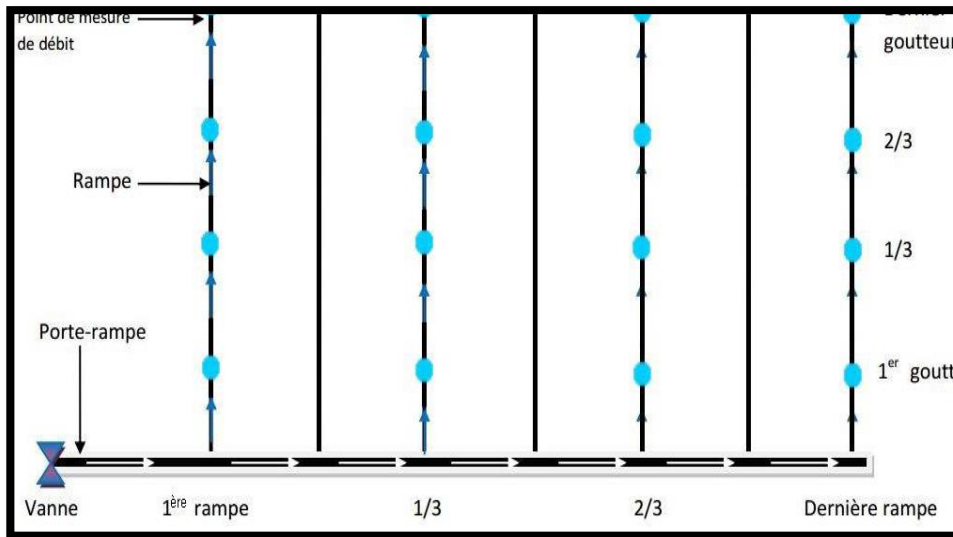
L'étude de l'homogénéité de la répartition de l'eau au niveau du poste d'arrosage s'est basée sur le test d'uniformité et le coefficient d'uniformité proposé par Keller et Karmeli 1974. Ce coefficient (CU) est défini comme suit :

$$CU = (q_{25} / q) * 100, \text{ avec :}$$

- CU = coefficient d'uniformité d'arrosage en (%)
- $q_{25}$  : Débit moyen du quartile inférieur (4 plus faibles valeurs de débit en l/h)
- $q$  : débit moyen (l/h) des 16 goutteurs mesurés.

Ce test tient compte de l'écart relatif entre les débits les plus faibles et le débit moyen des distributeurs et nous renseignera sur les problèmes éventuels de colmatage ou une hétérogénéité dans la fabrication du matériel. Ces deux phénomènes peuvent être décelés après la mesure du débit pour un échantillon de 16 goutteurs uniformément répartis sur le secteur d'irrigation (Cemagref 2003 cité par El Amri A. et al. (2014)) en suivant le protocole décrit dans le bulletin FAO 36 (Vermeiren L. (1983)) comme illustré par le schéma ci-dessous :





→ : Sens d'écoulement de l'eau sur les rampes et les portes rampes

● : Points de mesure

**Figure 11** : Emplacement des points de mesure du CU

Selon certains auteurs, trois cas sont envisagés en fonction des valeurs prises par ce coefficient :

**Tableau 7** : Normes d'interprétation des C.U

(El Amri et al 2012, Benouniche M. et al., (2014))

Classes	Appréciation
CU > 90 %	Bonne uniformité : Pas d'intervention sur le réseau
70% < CU < 90%	Moyenne uniformité : Le réseau doit être nettoyé
CU < 70%	Uniformité médiocre (*)

(\*) Hétérogénéité des débits est très élevée. Si le réseau est neuf, il faut refuser l'installation. Si le réseau fonctionne depuis un certain temps, il faut impérativement chercher les causes de colmatage et traiter énergiquement.

### **III-1- 6-2- Qualification de l'Uniformité d'arrosage**

Plusieurs facteurs apprécient l'uniformité d'arrosage et à titre indicatif on peut citer :

#### **III-1- 6-2-1 Ecart du débit théorique par rapport à la moyenne**

Pour qualifier l'uniformité d'arrosage, les écarts des débits moyens par rapport aux débits nominaux ( $E_c$ ) ont été déterminés en utilisant la formule suivante (Laiti A. et al., (2004), El Amri A. et al., (2012)) :

$$E_c (\%) = (1 - (Q / Q_n)) * 100$$

Avec  $Q_n$  : débit nominal du goutteur (théorique l/h)

$Q$  : débit moyen des goutteurs de l'échantillon testé

Selon Laiti A. et al 2004, les goutteurs appartiennent à deux classes en fonction de la valeur  $E_c$  :

- Classe A si  $E_c$  est inférieure à 5%,
- Classe B si  $E_c$  est inférieure à 10%.

#### **III-1- 6-2-2 Ecart du débit entre les goutteurs défavorisés et ceux favorisés**

Cet écart de débit ( $\Delta q$ ), traduisant la variation entre les goutteurs les plus défavorisés situés en queue de rampe et ceux favorisés situés généralement en tête de rampe, est calculé de la manière suivante :

$$\Delta q = [(1 - (Q_{min}/Q_{max})) * 100, (Laiti A. et al. (2004), Mofoke, A.L.E. et al. (2004))$$

Laiti A. et al 2004 ont rapporté que cette valeur de  $\Delta q$  peut être exprimée en fonction du coefficient de variation technologique ( $cv$ ) de la façon suivante :

$$\Delta q = [(4 cv) / (1+2cv)] \times 100, \text{ Avec,}$$

$$Cv (\%) = (\sigma(q)/\bar{q}) \times 100$$

$\sigma(q)$  : Ecart type

$\bar{q}$  : Débit moyen de l'échantillon testé de 25 goutteurs

L'appréciation qualitative des distributeurs en fonction des valeurs de  $cv$  est définie à partir de la norme ISO 9262 proposant deux classes :

- Classe A :  $cv$  inférieur à 5%.
- Classe B :  $cv$  inférieur à 10%.

Plus la valeur de  $cv$  n'est élevée, plus les écarts entre les débits extrêmes des goutteurs sont importants.

Pour obtenir une uniformité acceptable de l'arrosage, Christiansen propose de tolérer un écart maximal de 10% sur les débits des différents asperseurs mis en jeu. L'écart des pressions de fonctionnement doit donc être limité à environ 20%. En irrigation localisée, les rampes portant les goutteurs sont dimensionnées (diamètre et longueur) de manière à ce que la différence de débit entre les différents éléments n'excède pas 10% du débit moyen. Compte tenu des caractéristiques des goutteurs, cela conduit à tolérer un maximum de différence de charge de 10 à 15 % et de 20% de la pression moyenne respectivement pour les goutteurs à long cheminement et les goutteurs à régime turbulent (Clément R. et al., (1990)).

### **III-1-7 Efficience du système d'irrigation**

L'agriculture irriguée est actuellement confrontée à un double défi :

- Le premier est d'améliorer l'efficience globale d'utilisation de l'eau des systèmes d'irrigation.
- Le second est d'augmenter la productivité de l'eau utilisée

Les définitions du terme « efficience » utilisés diffèrent selon les disciplines scientifiques concernées : Ainsi, pour les ingénieurs de l'irrigation s'intéressant aux volumes et aux débits, l'efficience mesure un rendement et des pertes entre deux points (entrée et sortie) le long du système d'irrigation (Bouaziz A. et al., (2002)). Pour la présente contribution, seule l'efficience d'application et l'efficience globale d'utilisation de l'eau d'irrigation sont prises en compte et seront détaillées dans les chapitres qui suivent.

### **III-2 Diagnostic de la Fertigation**

La Fertigation consiste à injecter les éléments nutritifs avec l'eau d'irrigation pour leur permettre d'être rapidement absorbés par les cultures. Sans eau, pas d'absorption possible par les racines. (Ferti-pratiques, (2015)). En irrigation localisée, le processus de filtration à plusieurs niveaux fait que l'eau d'irrigation ne présente pas de risque majeur de colmatage pour les distributeurs. Toutefois, faute de la maîtrise de la pratique de la fertigation, le fonctionnement normal des distributeurs peut être compromis dans l'avenir par un bouchage progressif des goutteurs et une diminution de la section des conduites par les précipités des engrais mal utilisés.

#### **III-2- 1 Paramètres de l'injection**

Les appareils d'injection permettent d'introduire des engrais ou des produits de traitement dans l'eau d'irrigation (fertigation). Les paramètres du système d'injection des engrais sont jugés importants à déterminer afin de juger de l'effet de la Fert irrigation sur

l'accumulation des sels à la périphérie de la zone humide créée par le distributeur. Ce processus peut être dommageable pour la structure du sol ou pour la culture suivante (Penadille Y. (1998)). Il s'agit essentiellement de la concentration de la solution mère, du débit d'irrigation, du débit d'injection, du taux d'injection et de la concentration de la solution fille. Ces indicateurs de performance de la fertigation sont appréciés de la manière suivante :

- Le débit d'irrigation par propriété ( $Q_i$ ) est indiqué au niveau de la prise borne.
- La concentration de la solution mère  $C_m$  (g/l) étant le rapport entre la quantité d'engrais apportée ( $q$  en g) et le volume ( $v$  en l) d'eau utilisée pour solubiliser l'engrais ( $C_m=q/v$ ).
- Le débit d'injection  $D_i=v/t$  (l/h) n'est autre que le rapport entre le volume de la solution mère contenue dans la cuve et le temps nécessaire pour sa vidange.
- Le taux d'injection ( $T_i$ ) est déduit en divisant le  $D_i$  par  $Q_i$ .
- La concentration de la solution fille ( $C_{sf} = C_m \times T_i$ ), (Bouazzama B. et Bahri A. (2007))

### **III-2-1-1 Opération de rinçage du réseau d'irrigation.**

Le rinçage systématique du réseau d'irrigation après une injection d'engrais, évite le colmatage des distributeurs par dépôt de sels solubles et la corrosion des parties métalliques non protégées. Toute l'eau du réseau doit être remplacée par de l'eau claire. Cette opération est également contrôlée au sein des exploitations suivies dans le cadre de la présente évaluation.

Le temps minimal de rinçage dépend :

- Du volume d'eau des canalisations (rampes et portes rampes) après le point d'injection,
- Du débit de l'installation.

Il est donné par la formule :

$$T = (V/Q) \times 60$$

Où  $T$  = Temps minimal de rinçage en (mn)

$V$  = Volume du réseau en ( $m^3$ )

$Q$  = Débit de l'installation en ( $m^3/h$ )

A ce temps minimal, il convient de rajouter 5 mn (Penadille Y., (1998)). Le volume  $V$  ( $m^3$ ) peut être déterminé à partir de la formule suivante :

$$V = 3.14 \times (D/2)^2 \times L$$

Avec : D : Diamètre intérieur de la conduite en (m)  
L : Longueur de la conduite en (m)

Il est à préciser que lors du calcul du temps de rinçage nécessaire après une opération de fertigation des exploitations étudiées, nous avons eu recours au :

- Débit moyen pondéré de l'installation étant donné que le débit et la superficie accordés à chaque secteur varient au sein même de l'installation.

- Le diamètre moyen intérieur recommandé par type de conduite donné par le tableau ci-après :

**Tableau 8** : Diamètres des conduites PVC (PN : 16 bars) (Dimatit, (2015), <http://www.facebook.com/629254397323585/post/1629257697323255>)

$\varnothing$ extérieur.	Epaisseur	$\varnothing$ intérieur
(mm)	(mm)	(mm)
140	8.3	131.7
125	7.4	117.6
110	6.6	103.4
90	6.7	83.3
75	5.6	69.4
63	4.7	58.3
50	3.7	46.3

PN : Pression Nominale

$\varnothing$  : Diametre

### **III-3 Entretien préventif du système d'irrigation**

Il concerne les opérations d'entretien et de nettoyage du matériel contre les différents types de colmatage (physique, chimiques et biologiques). L'opération de purge et la vidange du réseau est également contrôlée

### **III-4 Changements engendrés par la reconversion**

Dans ce chapitre, il s'agit de mettre en relief l'impact de la modernisation de l'irrigation sur un certain nombre de paramètres agronomiques, socio-économiques et environnementaux

notamment l'aspect mise en valeur agricole, l'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines et la qualité des eaux de la nappe.

#### **III-4-1 Mise en valeur agricole**

Le volet mise en valeur agricole a été intégré dans cette étude et a fait l'objet d'une analyse. Les aspects retenus pour cette évaluation concernent entre autres :

- Les systèmes de cultures adoptés,
- L'intensification culturale en évaluant le taux d'occupation du sol (**TIC%**) qui n'est autre que le rapport entre la superficie assolée et la superficie totale de l'exploitation cultivable.
- La commercialisation des productions
- L'efficacité agronomique de l'eau d'irrigation ( $\text{kg/m}^3$  eau) définie comme étant le rapport entre le rendement obtenu et la consommation en eau d'irrigation par hectare.
- La valeur ajoutée à l'hectare

#### **III-4-2 Utilisation des eaux souterraines**

La réduction des prélèvements d'eau d'irrigation à partir de la nappe est l'un des objectifs assignés au projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée. La présente étude vise entre autres à vérifier si les usagers agricoles recourent encore à l'eau souterraine et évaluer en conséquence la part des eaux provenant de la nappe dans la satisfaction des besoins en eau d'irrigation des exploitations.

#### **III-4-3 Qualité des eaux de la nappe**

L'approche consiste à suivre le bilan ionique de l'eau de la nappe depuis les premières mises en eau des secteurs pilotes et de les comparer à une situation de référence d'avant-projet. A travers cette appréciation, on peut déceler d'éventuels effets du nouveau mode d'irrigation introduit dans la zone sur la qualité de l'eau souterraine et son aptitude à l'irrigation.

***CHAPITRE IV***  
***RESULTATS ET***  
***DISCUSSIONS***

## **IV- Résultats et discussions**

La dimension transdisciplinaire de la notion de performance comporte :

- La performance hydraulique liée à la gestion de l'eau
- La performance agronomique afferante à la productivité de la terre
- La performance économique liée à la productivité du capital

### **IV -1 Diagnostic hydraulique du système d'irrigation**

#### **IV -1-1 Qualité de l'eau d'irrigation de surface** (Barrage Bin El Ouidane)

La qualité de l'eau est un élément essentiel au bon fonctionnement d'un réseau d'irrigation localisée. Les éléments constitutifs de l'eau d'irrigation, à des concentrations bien déterminées, peuvent expliquer les risques d'obstruction des distributeurs et la dégradation de l'état du sol et par conséquent affectent la croissance et le développement des cultures.

Depuis quelques décennies, la protection et la conservation des milieux naturels, notamment la qualité des eaux, sont devenues une préoccupation majeure et un objectif principal dans les programmes de développement (BOUALLA N. (2018))

Le tableau ci-après donne la qualité de l'eau d'irrigation du barrage Bin El Ouidane alimentant les secteurs de la reconversion collective à l'irrigation localisée. Les résultats moyens des analyses de l'eau sur la période 2013-2017 (effectuées au laboratoire de l'ORMVA du Tadla) se présentent comme suit :

<b>Ions</b>	<b>Symbole</b>	<b>meq/l</b>	<b>mg/l ou g/m<sup>3</sup></b>
<b><u>Cations (ions basiques)</u></b>			
.Calcium	Ca <sup>2+</sup>	2,520	50,40
.Magnesium	Mg <sup>2+</sup>	1,600	19,52
.Sodium	Na <sup>+</sup>	1,286	29,59
.Potassuim	K <sup>+</sup>	0,055	2,14
<b><u>Anions (ions acides)</u></b>			
.Chlorures	Cl <sup>-</sup>	1,800	63,90
.Sulfates	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,590	23,61
.Carbonates	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0,440	13,20
.Bicarbonates	HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	3,460	211,06
.Nitrates	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,101	6,29

NB: meq/l = (mg/l) / Pe, (Pe: Poids equivalent)

**Tableau 9** : Bilan ionique moyen de l'eau du Barrage Bin El Ouidane  
Sur la période 2013-2017 (Source ORMVAT 2017)



A partir des données du tableau ci-dessus, le Taux de Sodium échangeable (SAR) et le taux de sodium (% Na) ont été déterminés comme porté sur le tableau ci-après :

	PH	CE mmhos/cm	SAR	% Na
Moyenne	7,63	0,51	0,96	25,46
ET	0,13	0,03	0,62	15,06
CV (%)	1,75	5,30	64,42	59,17

**Tableau 10** : Paramètres de qualité de l'eau du barrage Bin El Ouidane Enregistrés durant la période 2013-2017

L'analyse des données du tableau ci-dessus montre que :

- Le PH est moyennement basique et vaut 7.63. Il est dans la gamme normale d'eau apte à l'irrigation (norme entre 6.5 et 8.4, Phocaides A. (2008) et entre 6.5 et 9.5 norme OMS cité par Gouaiddia L. (2012)).
- Salinité : la conductivité électrique est très faible (0.51 mmhos/cm, soit une concentration totale en sels de  $0.51 \times 640 = 326.4$  mg/l, restant inférieur au seuil de 1500 mg/l (Phocaides A. (2008)). Il n'y a donc aucune restriction pour les sols et les cultures. Ces eaux non salées ne renferment que  $29.59 \text{ g/m}^3$  de Na avec des quantités importantes en Magnésium ( $19.52 \text{ g/m}^3$ ) et en Calcium ( $90.40 \text{ g/m}^3$ ) jugées bénéfiques pour le sol puisqu'elles évitent la dispersion des agrégats du sol et la détérioration de sa structure provoquée par l'adsorption du sodium par le sol en remplacement aux ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , rendant ainsi le sol imperméable à l'eau et à l'air.
- Nitrates : La teneur est très faible (2.29 mg/l) ce qui la classe dans la grille des eaux d'excellente qualité (teneur < 10 mg/l, Labomag, (2012)).
- Le taux d'adsorption du sodium (SAR ou pouvoir alcalinisant) de l'eau d'irrigation est de 0.96, ce qui montre que le sol n'est pas affecté par le sodium adsorbé. Selon Phocaides A., (2008), les sols qui présentent un sodium échangeable supérieur à 15 sont sérieusement affectés (réduction du taux d'infiltration du sol).
- Le taux de carbonate de sodium résiduel qui n'est autre que la différence en meq/l entre les ions bicarbonates et les ions de calcium et magnésium ( $\text{RSC} = [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ , les concentrations étant exprimées en méq/l – F.M. EATON, (1950) cité par Gouaiddia L et al. (2012) vaut -0.22 et reste donc inférieur à la norme de 1.25 meq/l (Phocaides A., (2008)), chose qui qualifie cette eau de bonne qualité. Un RSC positif indique un risque de sodisation, lequel est d'autant plus fort que l'index est plus élevé. Dans le cas où l'index est négatif, la prise en compte des ions sulfates ( $\text{RSC}' = [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ , –

S. MARLET et J.O. JOB, (2006) cité par Gouaidia L, et al. (2012) permet de distinguer les eaux à risque de sodisation ( $RSC' > 0$  – "voie saline neutre à dominance chlorurée") de celles qui ne portent pas ce risque ( $RSC' < 0$  – "voie saline neutre à dominance sulfatée"). Dans notre cas le  $RSC'$  est de -0.22, ce qui écarte les risques de sodisation (voie saline neutre à dominance sulfatée").

- Taux de Matière en Suspension (MES) : le taux est satisfaisant ( $< 250$  mg/l) est ne pose pas de problème pour le gravitaire par contre en irrigation localisée une filtration est nécessaire pour réduire le taux du MES à moins de 100 mg/l pour prévenir le bouchage (Labomag, (2012))

D'après ce qui précède et compte tenu des directives de la FAO en matière d'évaluation de la qualité physicochimique des eaux d'irrigation (Ayers et Wistot, (1988)) on peut dégager ce qui suit :

- Les eaux d'irrigation présentent une salinité relative faible, ce qui les classe dans la catégorie ne nécessitant aucune restriction pour son utilisation en irrigation des cultures.

- Le pH de l'eau d'irrigation moyennement basique se trouve dans la gamme normale d'eau apte à l'irrigation

- Les risques d'imperméabilisation des sols en utilisant ces eaux d'irrigation sont nuls (effets de la salinité et du coefficient d'absorption du sodium sur la vitesse d'infiltration). Les ions les plus dominants sont  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  dont l'effet est bénéfique sur la structure du sol, alors que les ions pouvant présenter des risques de toxicité à savoir  $Na^+$  et  $Cl^-$  sont en fourchettes normales ( $< à 10$  meq/l, Phocaides A., (2008)).

Dans le cadre de ce travail, plusieurs indices et diagrammes ont été employées pour l'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation :

#### **IV -1-1-1 Indice de perméabilité (IP)**

Des études récentes (Younsi, 2001; Debieche, 2002 cité par ROUABHIA A.E.K. et DJABRI L. (2010)) ont indiqué que la perméabilité du sol dépend de plusieurs facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce que l'on appelle l'indice de perméabilité (IP) défini par (Doneen, (1961)) :

$$IP = ((Na^+ + (HCO_3^-)^{1/2}) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)) * 100$$

Où tous les termes sont en milliéquivalent par litre.

Dans notre cas, cet indice **IP = 0.58 ou 58 %**

Selon Ncibi K, Gaaloul N, and Gasmi A, (2016), La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation et est influencée par le contenu de sodium, de calcium, de magnésium et de bicarbonate dans le sol.

Selon Person, 1978 cité par Gouaidia et al. (2012) les sels minéraux contenus dans les eaux d'irrigation ont un impact sur le sol et les plantes, car ils peuvent causer des changements dans la structure du sol (modifiant ainsi sa perméabilité et son aération) et perturber le développement des plantes.

Pour évaluer la qualité des eaux d'irrigation du barrage Bin El Ouidane, nous avons utilisé le Diagramme de Wilcox modifié (1948) et le Diagramme de Richards (ou Riverside) pour appréhender le risque de salinisation et de sodisation des sols.

#### **IV -1-1-2 Diagramme de Wilcox modifié (1948)**

Le pourcentage du sodium par rapport à la somme des cations basiques est donné par :

$$\text{Na (\%)} = 100 * [(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^+ + \text{Mg}^+ + \text{Na}^+ + \text{K}^+)]$$

ROUABHIA A.E.K et DJABRI L. (2010)

Pour être utilisables, les eaux doivent contenir un taux de Na inférieur à 60%. Cette valeur représente le seuil maximum admissible pour l'usage agricole (Durand, 1958 cité par Khachai, 1999 ; Food and Agriculture Organisation (FAO), 1971) cité par BOUALLA N. (2018).

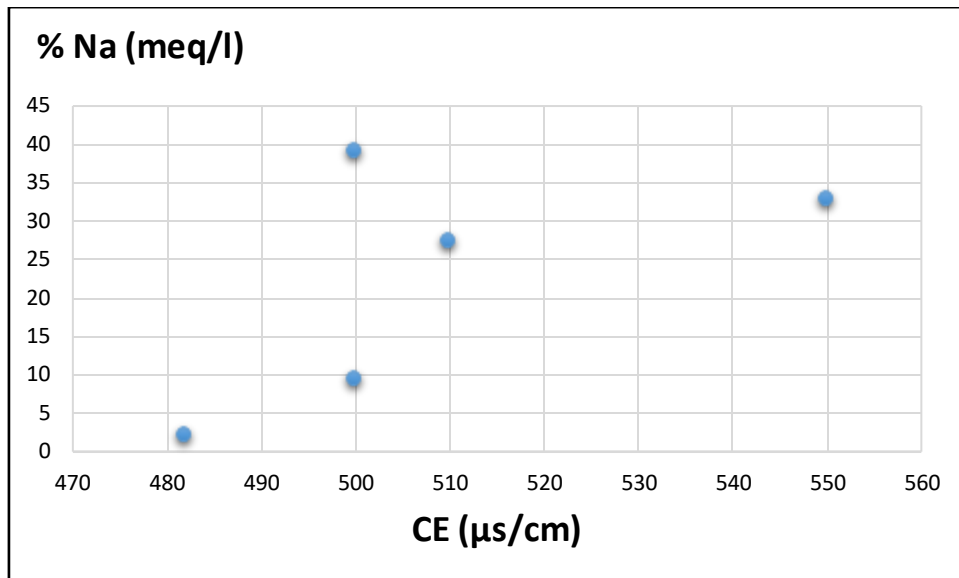
Le tableau ci-après récapitule les données liées à la qualité de l'eau d'irrigation provenant du Barrage Bin El Ouidane pour les cinq dernières années (2013 à 2017)

Tableau 11 : Conductivité électrique et le % du sodium de l'eau du barrage

Bin El Ouidane sur la période 2013-2017. (\*) : Labo ORMVAT (2017)

Periode	CE(μs/cm)	% Na (meq/l)
juil-13	482	2,09
Fevrier 2014	500	9,447
Fev 2015	500	39,008
Fev 2016	510	27,396
juil-17	555	32,639
Moyenne	510	22,12

Le diagramme de WILCOX ci-dessous qui tient compte de la conductivité électrique et le % Na permet d'apprécier la qualité de l'eau d'irrigation.



**Figure 12 : Diagramme de Wilcox modifié (1948) de l'eau du Barrage Bin El Ouidane**

En se referant à la figue ci-dessus et au diagramme porté à la page 19 de la partie bibliographique, l'eau du barrage Bin El Ouidane est d'excellente qualité (eaux assez faiblement mineralisées)

#### **IV-1-1-3 Diagramme de Richards**

La classification des eaux proposée en 1954 par Richards, chercheur à l'USDA de Riverside en Californie est encore utilisée à nos jours et est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation. En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides ou semi arides auxquelles elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau (BOUALLA N. (2018)).

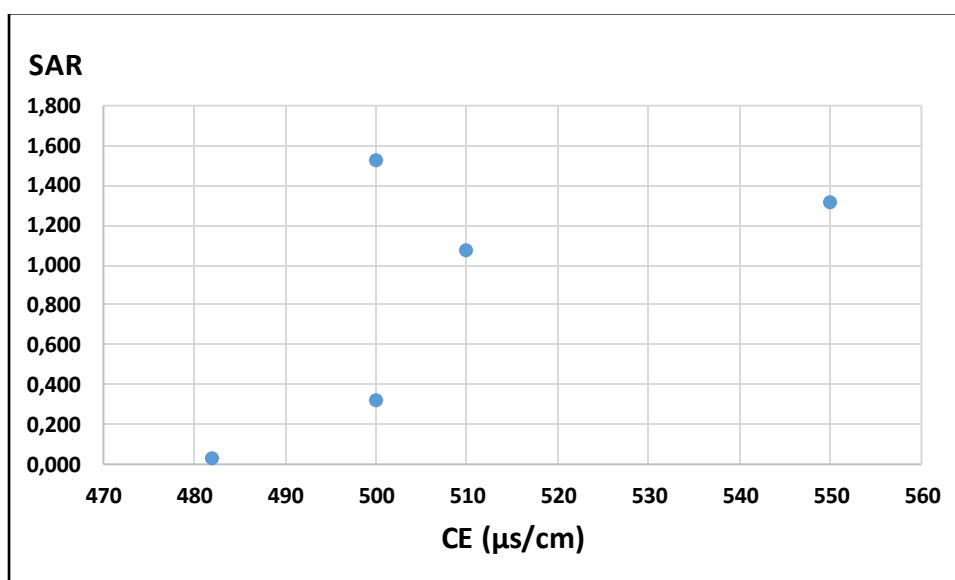
Le tableau ci-apres recapitule les données relatives à la conductivité électrique (CE) et le Taux de Soduim adsorbable (SAR) de l'eau du barrage Bin El Ouidane sur la periode 2013 à 2017.

**Tableau 12.:** Conductivité électrique (CE) et Taux de Sodium adsorbable (SAR)  
De l'eau du Barrage Bin El Ouidane pour la période 2013-2017.

Periode	CE( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )*	SAR
2013	482	0,026
2014	500	0,319
2015	500	1,525
2016	510	1,072
2017	550	1,312
Moyenne	508	1
ET	25,35	0,65
CV (%)	4,99	76,15

(\*) : Labo ORMVAT (2017)

Le diagramme de Richards qui en decoule est presenté sur le graphique ci-dessous :



**Figure 13 : Diagramme de Richard ou Riverside de  
L'eau du Barrage Bin El Ouidane**

La combinaison de la conductivité électrique et du SAR (Sodium Absorption Ratio) permet de discerner le risque de remplacement des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans le complexe absorbant (échange de base) par l'ion  $\text{Na}^+$  une fois abondant à l'état dissous dans le sol. Ce risque est d'autant plus élevé que la conductivité électrique et le SAR sont élevés (BOUALLA N. (2018)), ce qui n'est pas le cas pour l'eau du Barrage Bin El Ouidane. Cette eau est caractérisée par un

faible SAR enregistré sur les cinq dernières années (2013 à 2017) de l'ordre d'une moyenne de 1 et une faible salinité moyenne (CE : 508  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ).

## **IV-1-2 Contrôle du débit de l'installation**

### **IV-1-2-1 Pluviométrie horaire**

La pluviométrie horaire moyenne  $P_r$  (mm/h) réellement apportée au niveau des secteurs objet de la présente étude a été déterminée sur la base du débit moyen mesuré des goutteurs ( $q_{\text{moy}}$  en l/h) et le nombre de goutteurs à l'hectare (N) selon la relation suivante :

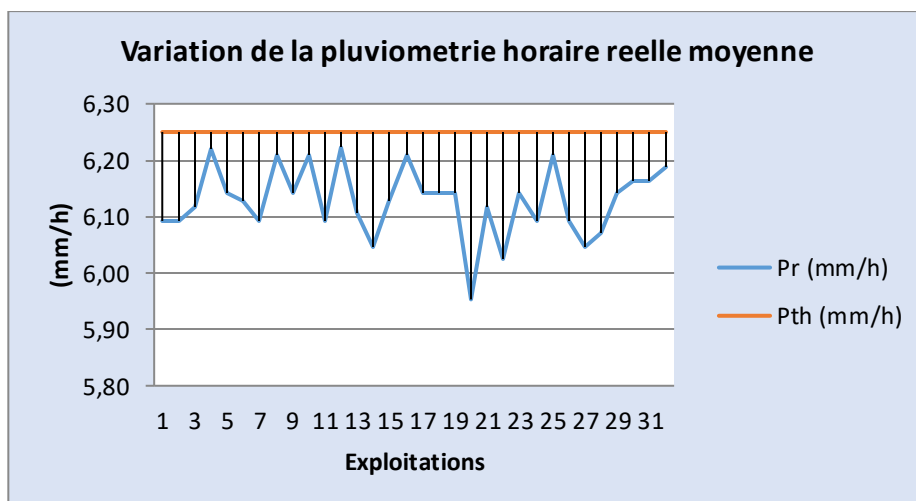
$$P_r \text{ (mm/h)} = q_{\text{moy}} \times N$$

Les données relatées au tableau ci-dessous montrent que la pluviométrie moyenne fictive enregistrée au niveau de toutes les exploitations est de 6.13 mm/h (contre une valeur théorique de 6.25 mm/h selon le fabricant) avec un Ecart type standard de 0.06 et un coefficient de variation de 1%. Le maximum enregistré est de 6.22 mm/h alors que le minimum Vale 5.95 mm/h.

**Tableau 13:** Variation de la pluviométrie horaire réelle par poste d'arrosage

	<b>P (mm/h)</b>
<b>Intervalle variation</b>	5,95 à 6,22
<b>Moyenne</b>	6,13
<b>Ecart type</b>	0,06
<b>Cv (%)</b>	1,01

Le graphique ci-dessous illustre la variation moyenne entre la pluviométrie réelle et celle théorique enregistrée au sein des exploitations évaluées.



**Figure 14:** Variation de la pluviométrie moyenne réelle Horaire des postes d'arrosage

Il y a lieu de noter une légère baisse de la pluviométrie fictive (appréciée à travers la mesure du débit moyen des goutteurs) par rapport à celle donnée par la charte du fabricant (basée sur le débit théorique du goutteur). Des explications à propos des faibles écarts observés entre les mesures théoriques et Celles Réelles peuvent être avancées : Si les conditions d'utilisation respectent les Spécifications Fournies par le fabricant, le débit mesuré au champ devrait être le même que celui fourni par le fabricant. Puisque les installations sont nouvelles et fonctionnent normalement ( $CU \geq 90\%$  pour l'ensemble des propriétés) excluant les problèmes de colmatage, la marge d'erreur liée aux différentes manœuvres lors de l'évaluation (erreurs de lecture, temps de mesure...) peuvent être responsables du faible écart entre les deux pluviométries (variation de 2% en moyenne comme stipulé sur le tableau ci-après).

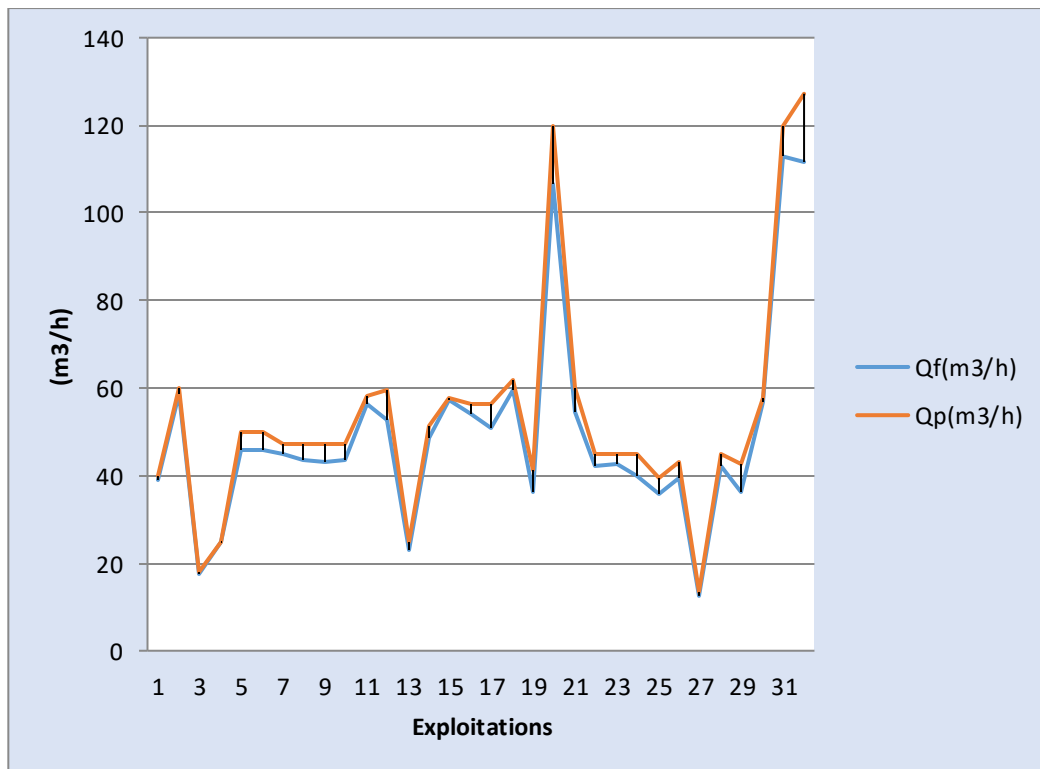
**Tableau 14 :** Variation entre la pluviométrie moyenne horaire Réelle et celle théorique

	%
<b>Intervalle variation.</b>	0.44 à 4.75
<b>Moyenne</b>	1.96
<b>Ecart Type</b>	0.99
<b>Cv (%)</b>	50

La variation entre la pluviométrie théorique et celle réelle ne dépasse guère les 5 % environs avec une moyenne de 1.96 %, un écart type de 0.99 et un coefficient de variation de 50 %.

#### **IV-1-2-2 Variation du débit de l'installation**

Le débit véhiculé pour les cultures pendant l'arrosage a été cerné en se servant des compteurs volumétriques individuels pour chaque propriété. Les résultats obtenus dans ce sens montrent que les débits mesurés in-situ sont légèrement supérieurs à ceux du projet comme illustré par le graphique ci-dessous.



**Cv** : Coefficient de variation ; **Qp** : Débit moyen du projet, **Qf** ; Débit moyen de fonctionnement

**Figure 15** : Variation entre le débit moyen réel et celui du projet  
Des exploitations étudiées

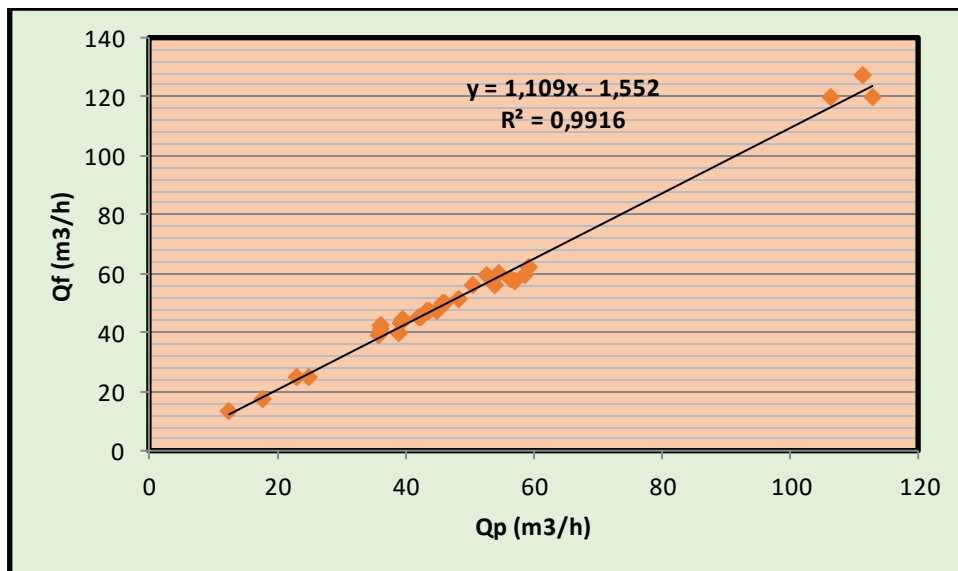
Le tableau ci-après relate clairement le dépassement de débit constaté avec un Ecart moyen de 6.75 % environ et un coefficient de variation de 57 %. Cette faible variation de débit traduit d'une part l'absence de colmatage à l'instant de l'évaluation (se traduisant par une résistance au passage de l'eau), et d'autre part l'absence de fuites importantes d'eau au niveau du réseau d'irrigation nouvellement installé et dont la mise en eau a eu lieu le 06/01/2015.



**Tableau 15 :** Variation entre le débit moyen de fonctionnement et le débit Moyen du projet des exploitations étudiées

	%
Variation	0,52 à 15,25
Moyenne	6,75
Ecart Type	0.0388
CV (%)	57

Par ailleurs, il y a lieu de souligner comme illustré sur la figure ci-après, une forte corrélation ( $r^2 : 0.99$ ) entre le débit de fonctionnement des parcelles évaluées et celui prévu par le projet. Ce résultat se traduit par le fait que les installations sont nouvelles et fonctionnent normalement.



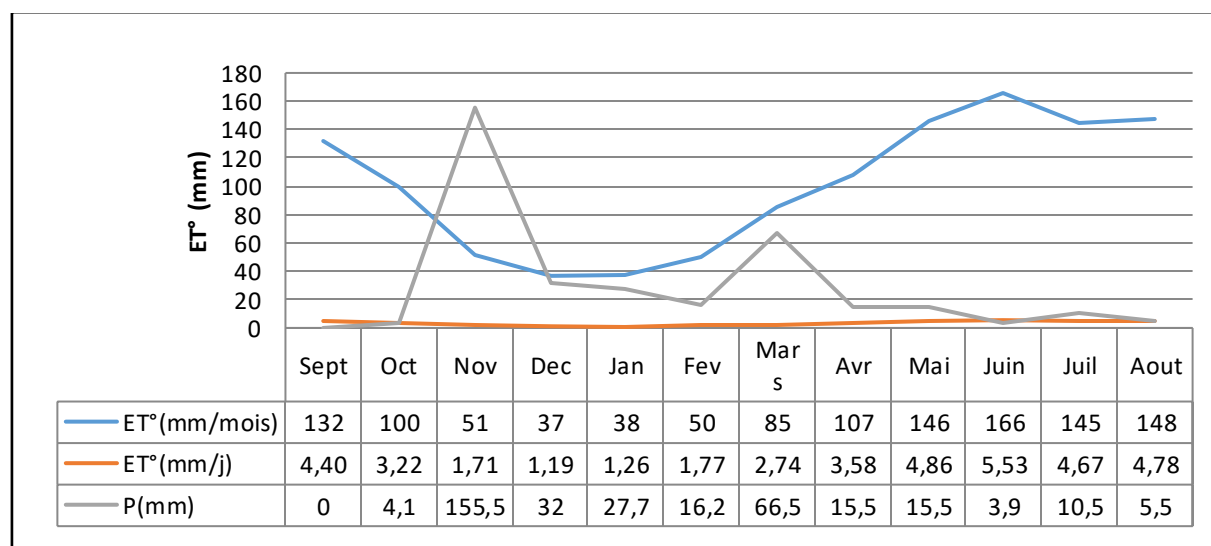
**Figure 16 :** Corrélation entre le débit réel et celui du projet Des parcelles étudiées.

#### **IV-1-3 - Gestion des arrosages**

La détermination des besoins en eau des cultures est une étape primordiale pour l'évaluation des volumes d'eaux à apporter et l'appréciation de la satisfaction des besoins des cultures par les agriculteurs.

### IV -1-3-1 Évapotranspiration de référence (ET°)

Au titre de la campagne agricole 2015/2016, les données de l'Évapotranspiration de Référence (ET°) de Penman-Monteith fournies par la station météorologique automatique M2 d'Ouled Bou Rahmoune la plus proche au site de l'étude, ont été utilisées pour déterminer les besoins en eau des cultures. La figure ci-après illustre les variations de la pluviométrie et l'ET° au cours de l'année agricole.



ET° : Évapotranspiration de référence en mm

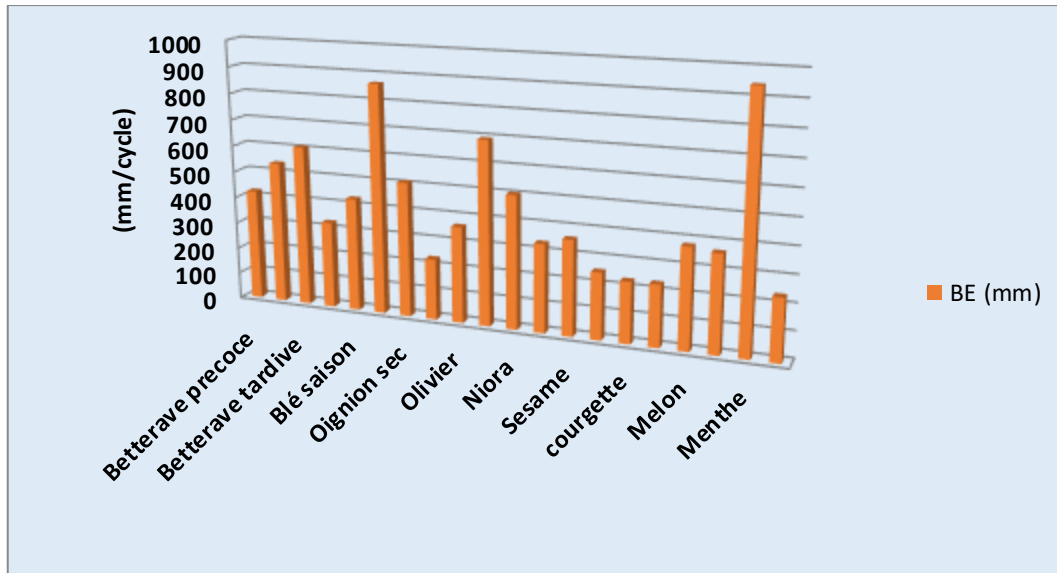
P : Pluie en mm/mois

**Figure 17** : variations de la pluviométrie et l'ET° au cours de la campagne Agricole 2015/16

Il se dégage du graphique ci-dessus que le pouvoir évaporant varie au cours de l'année. Ainsi, L'ET° moyenne journalière a varié de 1.16 mm/j enregistré au mois de décembre à 5.53 mm/j observée au mois juillet. Le cumul annuel de la demande climatique pour la campagne agricole 2015-2016 s'élève à 854 mm. L'occurrence des pluies a eu lieu à partir du mois de Novembre et s'est poursuivie jusqu'au mois d'Avril, avec un maximum de 156 mm enregistré au mois de Novembre et un minimum obtenu au mois de juin. Les pluies ont été bien réparties coïncidant avec les cycles de croissance des cultures principales semées en début de campagne agricole et totalisant une quantité annuelle de 353 mm. En fin de cycle des cultures annuelles, les pluies à elles seules ne peuvent combler les besoins en eau des cultures d'où le recours au complément d'irrigation à partir des eaux de surface (barrage) ou souterraines.

### **IV-1-3-2 Besoins en eau des cultures**

Les besoins en eau (BE) des différentes spéculations pratiquées par les agriculteurs objet de la présente évaluation sont relatés dans le graphique ci-après :



**Figure 18** : Besoins en eau des cultures des principales Spéculations pratiquées

Il ressort de ce qui précède que les besoins en eau diffèrent d'une culture à une autre et au sein de la même espèce en fonction de l'emplacement du cycle cultural dans l'année, de la variété utilisée et la longueur du cycle cultural. Ainsi, la luzerne et la menthe dont le cycle de croissance et de développement coïncide avec les fortes températures estivales sont très consommatrices en eau d'irrigation comparée aux autres cultures comme l'orge fourrager et le petit pois (récolté en vert) non exigeants en eau d'irrigation du fait de l'étalement de leurs phases végétatives sur une période de l'année caractérisée généralement par une faible demande climatique.

A la lumière des données afférentes aux besoins en eau des cultures pour chaque cycle cultural et dans un souci de la rationalisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation, le choix judicieux du calendrier des semences pour chaque espèce est d'une importance capitale puisqu'il permet de placer le cycle cultural dans des conditions de croissance optimales et en dehors des périodes chaudes de fortes demandes en eau d'irrigation. Ainsi, pour la betterave à sucre et le blé, les semis précoces sont avantageux par rapport aux semis tardifs puisqu'ils occasionnent une économie d'eau d'irrigation respectivement de l'ordre de 44 et 31% à allouer à d'autres cultures.

### **IV-1-3-2-1 Besoins nets et bruts d'irrigation**

Les quantités d'eau à restituer par irrigation ont été estimées selon une approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith permettant d'estimer l'ETc (besoins en eau des cultures). En tenant compte des quantités de pluies efficaces (Pe) reçues durant le cycle de la culture et de l'efficience de l'irrigation (Ei en %) on déduit :

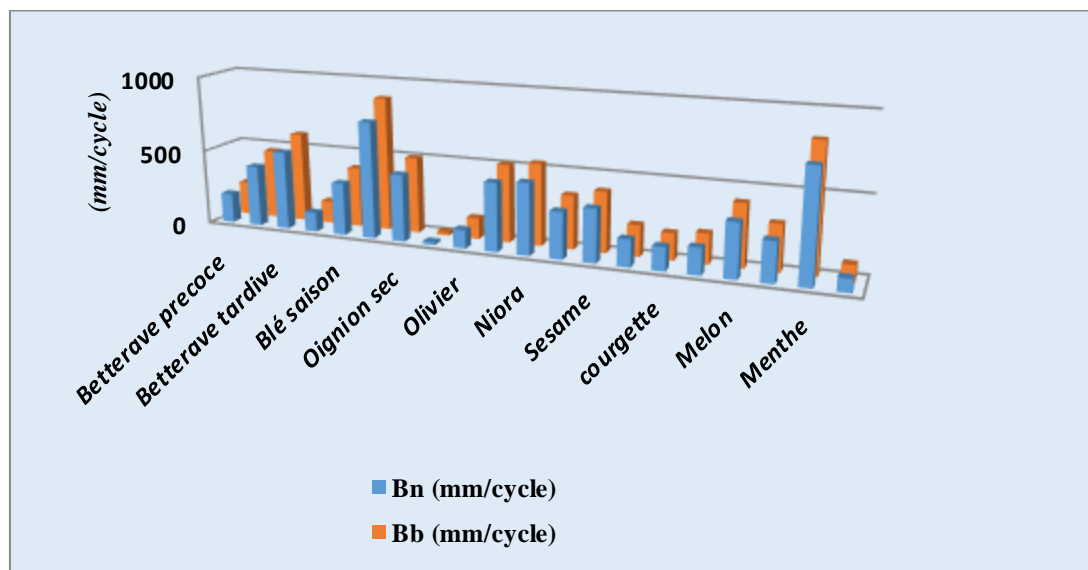
- Les besoins en eau d'irrigation nets  $B_n = ET_c - P_e$
- Les besoins en eau d'irrigation bruts  $B_b = B_n / E_i$ .

**NB** : Pe : Pluie efficace/mois

- $P_e = 0.6 * P$  si  $P < 75$  mm et
- $P_e = 0.8 * P$  si  $P > 75$  mm

(Phocaides (2008))

La figure ci-dessous donne les besoins en eau d'irrigation (Bb et Bn) des cultures pratiquées par les agriculteurs dans la zone d'étude.



**Figure 19**: Besoins en eau d'irrigation (Bb et Bn) des cultures pratiquées.

### **IV-1-3-2-2 Volumes d'eau d'irrigation fictifs apportés par les agriculteurs**

Les volumes d'eau réellement apportés par les irrigants, ont été calculés de la manière suivante :

$$V = T \times Q$$

Avec :

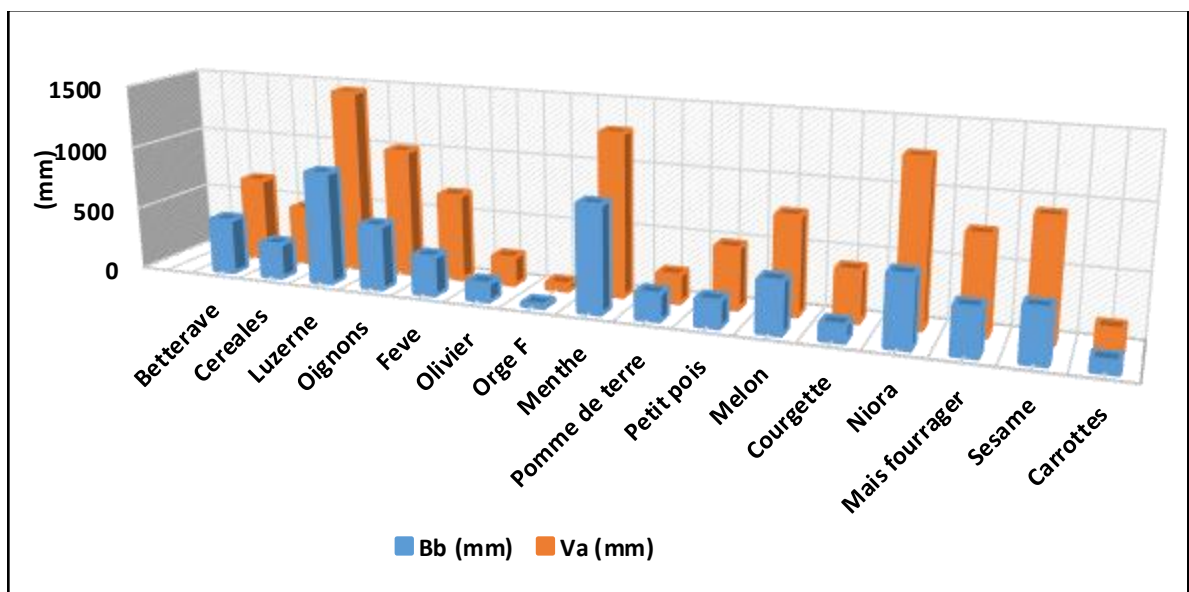
**V** : Volume consommé (m<sup>3</sup>),

**Q** : Débit du secteur (m<sup>3</sup>/h),

**T** : Temps d'irrigation (h)

Le temps et le nombre d'irrigation accordé à chaque culture ont été enregistrés par les exploitants. Un recoupement avec le volume global (affiché par les compteurs individuels) consommé par propriété a été effectué pour vérifier et ajuster les données issues des déclarations des différents usagers agricoles.

Le graphique ci-dessous donne une comparaison entre les quantités réellement apportées par les usagers agricoles et les besoins bruts d'irrigation théoriques estimés selon l'approche climatique. Il en ressort que pour la plupart des cultures, les irrigants apportent plus de ce qu'il faut aux cultures, ce qui constitue un gâchis en eau d'irrigation que l'agriculteur peut économiser pour améliorer davantage l'efficacité d'utilisation de cette denrée devenant de plus en plus rare.



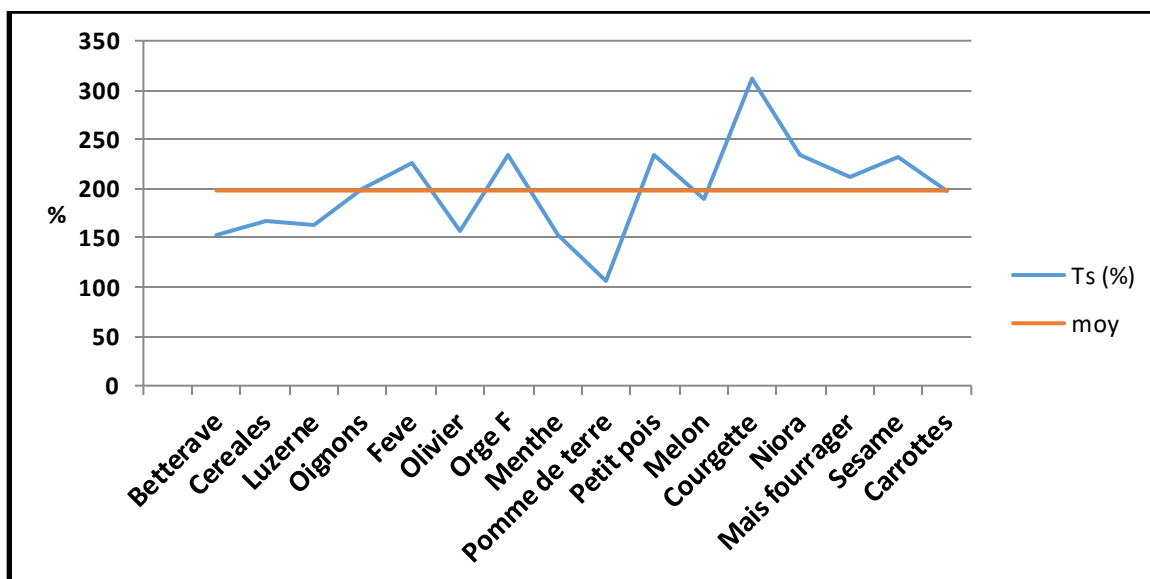
**Bb** : Besoins bruts

**Va** : Volume d'eau apporté

**Figure 20** : Comparaison entre les quantités réellement apportées par les usagers Agricoles et les besoins théoriques bruts d'irrigation.

#### **IV-1-3-3 Satisfaction des besoins en eau des cultures**

Le graphique ci-dessous illustre la satisfaction des besoins en eau des cultures par les apports d'irrigation.



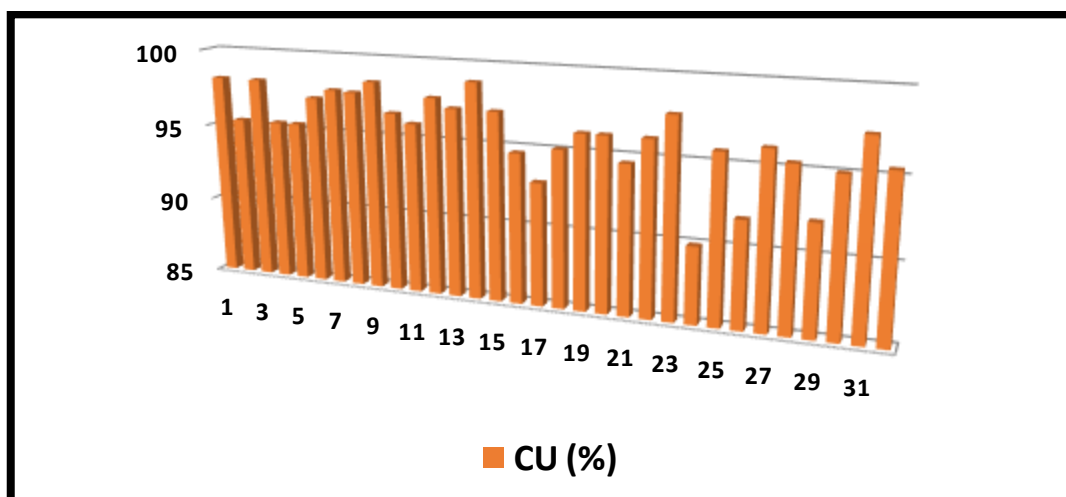
**Figure 21:** Satisfaction des besoins en eau des cultures par les irrigations.

Il ressort de l'analyse du graphique ci-dessus que les besoins en eau moyens des cultures ont été largement couverts par les irrigations appliquées par les agriculteurs avec des taux moyens de satisfaction variant de 106 à 312% (avec une moyenne de 198 %) respectivement pour la pomme de terre et la courgette. Ces dépassements constituent un gâchis d'eau d'irrigation et peuvent être économisés pour être alloués à d'autres cultures. Cette situation est expliquée par le fait que les usagers agricoles sont encore imprégnés du mode d'irrigation gravitaire très consommateur en eau d'irrigation et que l'irrigation localisée à laquelle se sont reconvertis reste encore pour eux une nouvelle technique nécessitant un accompagnement et un encadrement rapproché.

#### **IV-1-4 Uniformité de la distribution de l'eau d'irrigation**

##### **IV-1-4-1 Coefficient d'Uniformité (CU)**

Ce paramètre a été évalué en début de campagne au niveau des propriétés retenues pour l'étude. Les valeurs obtenues comme mentionnées sur le graphique ci-dessous oscillent entre 90% et 98 % avec une moyenne de 96 %, un écart type standard de 2.03 et un coefficient de variation de 2.12%. A partir de cette figure et en se référant au tableau de classification de CU, toutes les parcelles évaluées dépassent les 90% justifiant ainsi un bon état du réseau et de l'absence de problème de colmatage au moment du suivi mis en œuvre. Selon les normes adoptées par Cemagref, toutes les installations fonctionnent normalement et ne présentent pas d'anomalies apparentes.



**Figure 22** : Variation de l'uniformité d'arrosage au niveau des Exploitations étudiées

Les débits moyens par exploitation ont varié de 1.91 à 2.03 l/s avec une moyenne de 1.96 l/s pour un coefficient de variation de 1.12%. De telles variations relativement faibles représentent un bon signe d'une répartition homogène de l'eau d'irrigation à la parcelle.

#### **IV-1-4-2 Qualification de l'uniformité de la distribution**

Les écarts aussi bien entre les débits des distributeurs favorisés et ceux défavorisés qu'entre le débit moyen et le débit nominal de fonctionnement des goutteurs ont été appréciés au travers les paramètres de qualification de l'uniformité d'arrosage mentionnées dans le tableau ci-dessous. Les résultats obtenus montrent que la moyenne des écarts constatés est de 8.55% entre les distributeurs favorisés et ceux défavorisés et de 1.96% par rapport au débit nominal de fonctionnement des goutteurs (théorique). Les débits mesurés sont donc jugés bons et presque analogues aux exigences requises (2 l/h). De même, les écarts entre les débits mesurés et le débit nominal sont faibles, ce qui confirme bien la bonne uniformité d'irrigation à la parcelle assurée par le bon état du réseau et l'absence du problème de colmatage. Toutefois, le colmatage du système au fil du temps (colmatage progressif) peut se poser sans un entretien correct et périodique par les différents moyens préconisés de la part des irrigants de la zone dans son intégralité. En effet, le colmatage des goutteurs est plutôt problématique, car il est difficile de nettoyer les goutteurs, comparativement aux filtres de la station de tête. L'origine de ce problème peut être due à différents facteurs biotiques ou non. Dans des situations

particulières, le colmatage des goutteurs observé sur une longue période, entraîne une diminution du débit par goutteur.

**Tableau 16** : variation des débits moyens des goutteurs

	Débit (l/h)			En (%)	
	Max	Min	$q_{moy}$	$(1-q_{min}/q_{max})*100$	$(1-q_{moy}/q_n)*100$
<b>Variation</b>	2,16 à 1,98	1,68 à 1,98	1,91 à 1,99	2,94 à 16,67	0,5 à 4,75
<b>Moyenne</b>	2,03	1,85	1,96	8,55	1,96
<b>Ecart T.</b>	0,05	0,07	0,02	3,86	0,99
<b>CV (%)</b>	2,58	3,66	1,01	45,07	50,39

$q_{moy}$  : Débit moyen

$q_n$  : Débit nominal

#### IV-1-5 Efficiences du système d'irrigation

Il existe plusieurs termes pour décrire l'efficacité d'un système d'irrigation :

##### IV-1-5-1 L'efficacité d'application (efficacité au champ)

Ce paramètre de performance est estimé par plusieurs auteurs selon le système d'irrigation utilisé. Selon Phocaidès A., 2008, le goutte à goutte présente le meilleur rendement de l'irrigation à la parcelle comparée aux autres techniques d'irrigation et se situe entre 90 et 95%. Cet indicateur sera apprécié de manière fictive in-situ à la parcelle et sur une culture de betterave à sucre.

Selon plusieurs auteurs (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>, Phocaidès A., 1998 et Hanafi S., 2011, Kambou D. et al 2014), l'efficacité d'application ( $E_a$ ) relevant de la pratique d'irrigation est définie par :

$$E_a = (W_s / W_d) * 100$$

Avec :

- $W_s$ : Quantité d'eau retenue dans le sol au niveau de la zone racinaire.

- $W_s = S_f - S_i$ , avec  $S_i$  et  $S_f$  les stocks en eau dans le profil enraciné déterminé par gravimétrie respectivement avant et après irrigation. ( $W_s \leq SWD$ ,  $SWD$  étant la réserve stockable dans la zone racinaire au moment de l'irrigation, Hanafi S., 2011).

- $W_d$ : Quantité d'eau apportée sur le champ lors de l'irrigation



La différence entre l'eau stockée dans la zone racinaire  $W_s$  et la quantité d'eau apportée sur la parcelle est l'eau perdue par percolation profonde au-delà de la zone racinaire, par ruissellement ou évaporation et toutes les fuites des asperseurs ou des canalisations du goutte à goutte, l'eau des asperseurs entraînée par le vent, (Howell, 2002 : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>). Les quantités et les types de pertes d'eau qui apparaissent dans le transfert de l'eau entre la source et l'endroit où l'eau est effectivement utilisée dépendent grandement du mode d'irrigation et du système d'apport d'eau utilisée (<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole>).

La réserve stockable dans la zone racinaire (SWD) correspond à la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante. Cette réserve est qualifiée de réserve utile (RU) en eau d'un sol, exprimée en (mm/m). Elle est donnée par la formule suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times D_a \times z \times 10$$

Avec :

$H_{cc}$  : Humidité à la capacité au champ (%),  $H_{pf}$  : Humidité au point de flétrissement (%),  $D_a$  : Densité apparente ( $g/cm^3$ ),  $Z$  : profondeur racinaire (m).

(Phocaidés A., 2008, Kambou D. et al 2014, Ammari O. et Bayali N., 2016)

D'après les résultats de l'étude de la caractérisation de référence des paramètres environnementaux de la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée, les sols de la zone d'étude ont une perméabilité faible à moyenne comme le stipule le tableau ci-après :

**Tableau 17** : Perméabilité des horizons superficiels du sol de la zone d'étude  
Source LABOMAG (2012).

Horizon du sol (cm)			
	0-30	30-50	Moyenne
ks (cm/h)			
Perméabilité (muntz)	0,37	0.28	0.32

À partir des données relatives à la caractérisation hydrodynamique des sols de la zone d'étude portées dans le tableau ci-dessous, et en se servant de la formule de calcul de la réserve utile en eau, citée précédemment on peut aisément calculer la RU par horizon du sol.

**Tableau 18** : Caractéristiques hydrodynamiques du sol

De la zone d'étude (Ammari O. et Bayali N., (2016))

<b>Horizon (cm)</b>	<b>Da (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>He(%)</b>	<b>Hcc (%)</b>	<b>Hpf (%)</b>	<b>Mo (%)</b>
0 à 10	1,04	29,80	35	19	1,80
10 à 20	1,11	29,49	35	19	1,05
20 à 30	1,02	29,25	36	20	1,89
30 à 40	1,07	29,32	34	19	1,26
40 à 60	1,40	27,85	36	20	0,69
60 à 80	1,51	26,31	35	19	0,56
80 à 100	1,27	27,38	36	20	0,61

**Mo** : Matière organique

Le tableau ci-après donne la Reserve Utile par horizon du sol ainsi que celle cumulée.

**Tableau 19** : Calcul de la Reserve Utile par horizon du sol

(\*) Ammari O. et Bayali N., (2016))

<b>Horizons</b>	<b>RU(*)</b>	<b>RU cumulée</b>
<b>cm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
0-10	16,64	16,64
0 à 10	17,76	34,4
10 à 20	16,32	50,72
30 à 40	32,1	82,82
40 à 60	44,8	127,62
60 à 80	48,32	175,94
80 à 100	40,64	216,58

Il ressort que la Reserve Utile du sol est d'environ 217 mm pour une profondeur de 1 mètre. Cette quantité importante d'eau est expliquée par la texture Argilo-Limoneuse de ce sol (voir tableau ci-dessous) caractérisée par une forte proportion de particules fines (limons et argiles)

emmagasinant davantage d'eau, et dont une grande partie de ses réserves est disponible pour les plantes (Reserve Facilement Utilisable).

**Tableau 20** : Granulométrie des sols de la zone d'étude

Ammari O. et Bayali N., (2016)

A (%)	LF (%)	LG(%)	SF (%)	SG (%)
40,16	25,95	14,22	16,75	2,92
41,88	23,67	15,45	16,23	2,77
43,9	21,8	14,64	16,11	3,54
39,23	28,93	8,84	19,57	3,43
44,42	25,21	10,89	14,36	5,12
43,86	24,74	11,54	14,18	5,67
46,23	23,38	11,08	14,54	4,77

A (%) : Argile

SF(%) : Sable Fin

LF(%) : Limon Fin

SF(%) : Sable Grossier

LG(%) : Limon Grossier

L'Efficienc e d'application ( $E_a$ ) de l'irrigation tient compte de l'eau perdue dans l'atmosphère, avant d'atteindre la culture et celle perdue par drainage ou ruissellement. A travers les caractéristiques physiques des sols de la zone d'étude, on peut déterminer la réserve stockable dans la zone racinaire pour des horizons différents.

Les pertes par percolation sont négligées du fait que les soles du site d'études sont faiblement à moyennement perméables et ont une forte capacité de rétention. Egalement les pertes dues aux fuites dans les vannes et infiltration sont absentes.

Les quantités d'eau apportées pendant les irrigations ont été maîtrisées à travers la lecture des relevés des compteurs en début et à la fin de l'irrigation.

Le calcul de l'efficienc e de l'application de l'eau d'irrigation a été effectué pour la culture de la betterave à sucre en début du cycle (début d'exploration des racines de l'horizon du sol  $z=30$  cm) et à la tubérisation où le pivot de la racine atteint l'horizon 30-60 cm ( $z = 60$ cm)

L'efficience moyenne d'application a varié de 90.41 à 90.67 % selon le stade de croissance et de développement de la culture et tourne autour d'une moyenne de 90,54 % comme le montre le tableau ci-après :

**Tableau 21:** Détermination des différentes efficacités d'utilisation De l'eau d'irrigation.

	<b>Horizons du sol (z)</b>		
	<b>0-30 cm</b>	<b>30-60 cm</b>	<b>0-60 cm</b>
Dose nette mm/z	50,72	77,10	127,82
Dose irri ( mm) (*)			3,07
Dose irri mm(**)			5,11
Variation stock*(mm)	1,43	1,34	2,78
Variation stock** en (mm)	2,14	2,48	4,62
Ea* (%)			90,67
Ea** (%)			90,41
Ea moy (%)			90,54
CU (%)			95,90
Eg moy (%)			86,83

(\*) : Stade 4 feuilles, (\*\*) : Stade tubérisation

#### IV-1-5-2 L'efficience globale

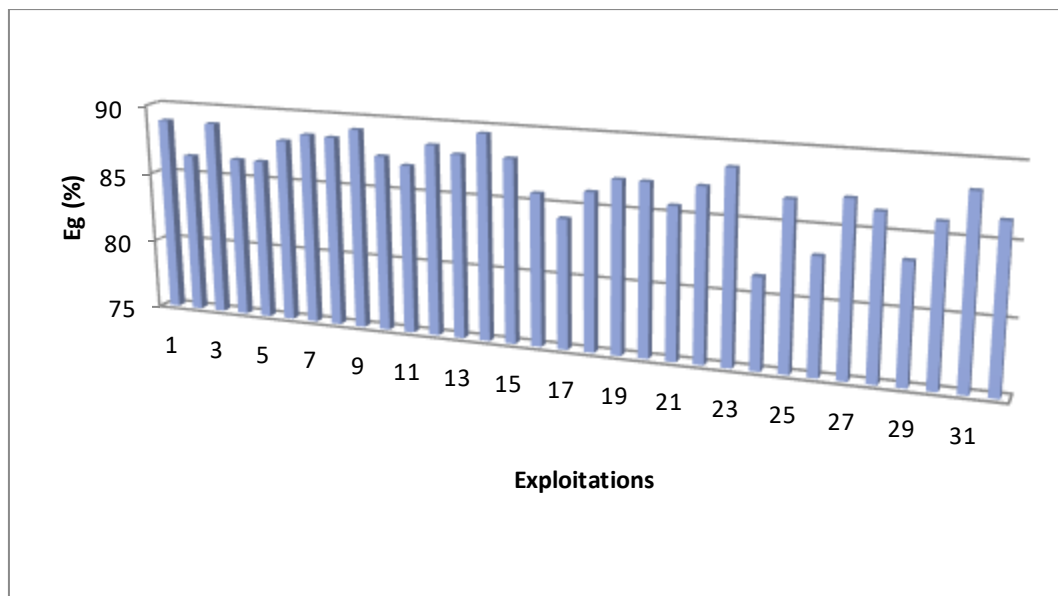
L'efficience globale (Eg) de l'irrigation localisée appelée aussi rendement hydraulique est définie comme étant le produit entre l'Efficience d'application de l'irrigation (Ea) et le Coefficient d'Uniformité d'arrosage (CU) :

$$Eg = Ea * CU \quad (\text{SCET-SCOM/ INGEMA 2009, Douzi et al 2015})$$

Le coefficient moyen d'uniformité de la distribution de l'ensemble des exploitations, mesuré en début de la campagne avant l'installation des cultures s'élève à 95.9 %. Ainsi, l'efficience globale moyenne de toutes les propriétés s'élève à 87 % environ comme décrite ci-après :

$$Eg = CU * Ea = 86.84 \%$$

L'analyse des différentes efficacités moyennes globales obtenues au niveau des exploitations ayant fait l'objet d'étude a montré une variation de ce paramètre de performance entre 82 et 89%, avec une moyenne de 86.84%, un écart type standard de 1.84 et un coefficient de variation de 2.12%. Le graphique ci-après illustre clairement ces variations entre les propriétés agricoles.



**Figure 23** : Efficacités moyennes globales des différentes exploitations

#### **IV-1-6 Diagnostic de la pratique de la fertigation**

Dans cette partie, nous allons procéder à une appréciation des principaux paramètres d'évaluation d'une technique de fertigation.

##### **IV-1-6-1- Engrais utilisés et seuil de solubilité**

L'incorporation de produit (engrais, produits de traitement) dans l'eau d'irrigation peut modifier la valeur du pH et augmenter le risque d'obstruction chimique par précipitation des sels dissous contenus dans l'eau d'irrigation. Les éléments à craindre sont le calcaire, le fer avec colmatage rapide de l'installation par développement de bactéries ferrugineuses (Au-delà de 1ppm de fer, il est préférable de renoncer à utiliser l'irrigation localisée), l'hydrogène sulfuré et le manganèse. En fait, le fer est à l'origine d'obstructions chimique et biologique (Penadille Y. (1998)). Les engrais couramment utilisés dans les exploitations enquêtées, ainsi que leurs taux de solubilité, se présentent comme suit :

**Tableau 22** : Engrais utilisés et seuil de solubilité

(\*) Source : Penadille Y. (1998)

Type	Unité fertilisation			Solubilité kg/100l (*)
	N	P	R	
. Phosphate D- Ammoniaque	18	46	0	66
. Phosphate M- ammoniaque	11	55	0	37
. Sulfate d'ammoniaque	21	0	0	75
. Ammonitrate	33.5	0	46	192
. Nitrate de potasse	13	0	50	31.6
. Sulfate de potasse	0	0	0	11
. Urée	46	0	0	103

Les doses moyennes d'engrais apportées par les agriculteurs aux cultures sont portées dans le tableau ci-dessous:

**Tableau 23** : Doses moyennes d'engrais apportées

Cultures	Dose moyenne (Q/ha)					
	DAP	MAP	Sulfate Ammoniaque 21%	Sulfate de potasse 50%	Ammonitrate 33.5%	urée 46%
Céréales	2,5	2	-	-	2,5	1.5
Betterave	6	3	3,5	-	5	2
luzerne	1,5	-	-	-	2	-
Agrume	1,5	2	-	3	5	1

**DAP** : Phosphate Di-ammoniaque 18-46-0

**MAP** : Phosphate Mono- ammoniaque 11-55-0

#### **IV-1-6-2 Etat initial de la fertilité du sol**

Pratiquement toutes les exploitations retenues pour cette étude ne pratiquent pas d'analyse du sol préalable pour avoir une idée du stock initial de sol en éléments fertilisants et raisonner ainsi, les besoins à restituer par la fumure minérale.

### **IV-1-6-3 Adoption de la pratique de fertigation**

Certains propriétaires (23% des cas enquêtés) quoiqu'ils disposent d'un système de fertigation, continuent d'épandre l'engrais manuellement surtout durant des épisodes précises (avant ou après les pluies), ce qui ne leur permet pas de tirer profit des avantages de la fertigation, notamment en matière de l'efficience pour l'azote et la réduction du risque environnemental comme rapporté par Ferti-pratiques (2015). Le reste des agriculteurs qui s'approprient cette technique manquent de formation pour l'usage à bon escient de cette nouvelle pratique qui nécessite un accompagnement et un encadrement rapproché. Ce constat sera davantage mis en exergue à travers le contrôle des différents paramètres de performance de cette technique de fertilisation.

### **IV-1-6-4 Contrôle des paramètres de l'injection**

La salinité de la solution fille (Csf) a été appréciée à travers la concentration de la solution mère (Csm en g/l) et le rapport d'injection de la pompe doseuse (Ti) qui n'est que le rapport entre le débit d'injection (Di en m<sup>3</sup>/h) et le débit d'irrigation (m<sup>3</sup>/h). Le débit d'injection est déterminé à partir du rapport entre le volume de la solution mère contenu dans la cuve d'engrais et le temps nécessaire à sa vidange.

Le tableau ci-dessous résume les résultats d'évaluation des principaux paramètres de performance de la fertigation.

**Tableau 24** : Résultats d'évaluation des principaux paramètres de Performance de la fertigation

	<b>Csm (g/l)</b>	<b>Di (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Csf (g/l)</b>	<b>Ti (‰)</b>
<b>Moyenne</b>	130,00	1,86	3,44	17,14
<b>E . Type</b>	66,14	1,12	7,35	15,63
<b>CV (%)</b>	50,88	60,45	213,52	91,16
<b>Min - Max</b>	50 à 300	0,2 à 2,31	0,48 à 34,04	4,83 à 78,65

Csm : Concentration de la solution mère,

Csf : Concentration de la solution fille

Di : Débit d'injection,

Ti : Taux d'injection

L'analyse des résultats liés à la pratique de la fertigation montre que:

- Le Taux de solubilité des engrais n'a pas été pris en considération dans la pratique de la Fertigation, ce qui peut entraîner avec le temps le dépôt des engrais non solubilisés dans les rampes, portes rampe et les distributeurs.
- La concentration de la solution fille, variant de 0.48 à 34 g/l, dépasse parfois les normes de tolérance préconisées par culture comme porté dans le tableau ci-après (20%, 6% et 6% des cas respectivement pour la luzerne, la betterave et le blé), ce qui peut affecter aussi bien la croissance et le développement des cultures que la structure du sol et la qualité de l'eau de la nappe.
- Les taux d'injection calculés ont varié de 4.83 à 78.65%, avec une moyenne de 17.14, un écart type de 15.63 et un Cv de 91.16%.
- Les concentrations des solutions mères ont varié de 50 à 300 g/l, avec une moyenne de 130g/l, un écart type de 60.14 et un Cv de 50.88%.
- Le débit d'injection a varié de 0.20 à 2.31 m<sup>3</sup>/h, avec une moyenne de 1.86 m<sup>3</sup>/h, un écart type de 1.12 et un Cv de 60.45%.

Le tableau ci-après donne les seuils de tolérance des cultures à la salinité

**Tableau 25** : Tolérances des cultures à la salinité.

Cultures	Extrait sol saturé (ECe) **		Eau d'irrigation (Ecw)*	
	ds/m	g/l	ds/m	g/l
Betterave à sucre	4	2,857	6	4,286
Blé tendre	4,5	3,214	6,75	4,821
Blé dur	2,1	1,499	9,45	2,2485
Luzerne	2	1,429	3	2,144

(\*\*) : Phocaides A. 2008.

(\*) :  $ECw = ECe \times 1.5$  (Mars 1984 cité par Phocaides A., (2008)).

#### **IV-1-6-5 Rinçage du réseau**

Le rinçage systématique du réseau après une injection d'engrais évite le colmatage des distributeurs par dépôts de sels dissous (cristallisation) et la corrosion des parties métalliques non protégées (Penadile Y. (1998)).



En se servant de données relatives aux diamètres intérieurs moyens recommandés des installations (rampes et portes rampes) des propriétés objet de l'évaluation, on peut calculer le temps de rinçage nécessaire par secteur d'irrigation pour évacuer les sels dissous au niveau des différentes parties de l'installation selon la formule déjà citée au paragraphe fertigation. Le tableau et la figure ci-après illustrent bien les résultats obtenus par exploitation.

**Tableau 26** : Temps de rinçage moyen nécessaire par secteur d'irrigation

<b>Exploitations</b>	<b>T<sub>rr</sub> (mm)</b>	<b>T<sub>re</sub> (mm)</b>
<b>Moyenne</b>	<b>29</b>	<b>27</b>
<b>Ecart type</b>	<b>6</b>	<b>14</b>
<b>CV(%)</b>	<b>20</b>	<b>52</b>

T<sub>rr</sub> : Temps requis de rinçage du réseau

T<sub>re</sub> : Temps de rinçage réellement effectué par les usagers

Le temps (T : min) minimal de rinçage est donné par :

$$T = (V/Q) \times 60$$

Où V = Volume du réseau en (m<sup>3</sup>)

Q = Débit de l'installation en (m<sup>3</sup>/h).

A ce temps minimal, il convient de rajouter 5 mn (Penadille Y., (1998)).

Le volume V (m<sup>3</sup>) peut être déterminé à partir de la formule suivante :

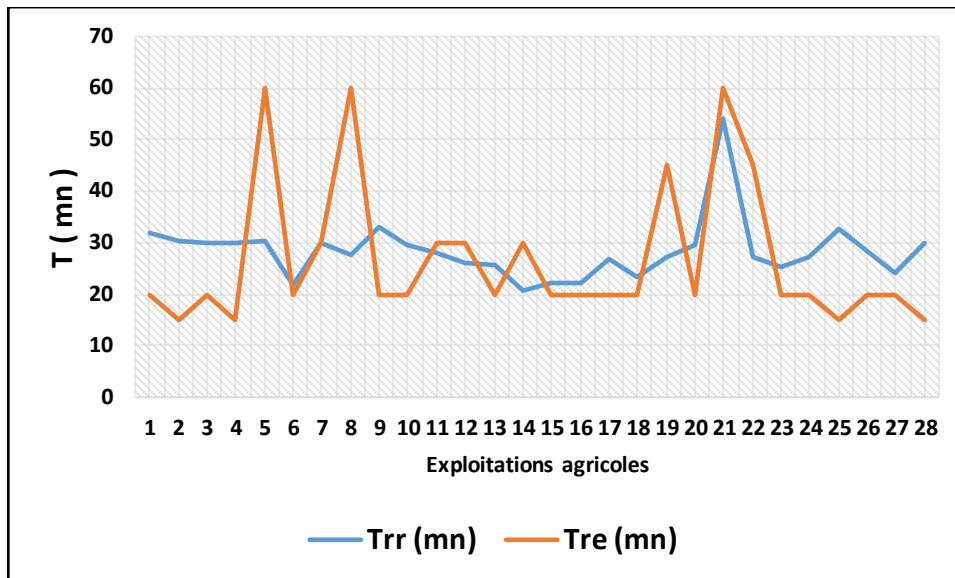
$$V = 3.14 \times (D/2) \times L$$

Avec :

D : Diamètre intérieur de la conduite en (m)

L : Longueur de la conduite en (m).

La figure ci-après illustre l'état de comparaison du temps de rinçage requis et celui fictif entre les exploitations étudiées.



**Figure 24** : Comparaison entre le temps de rinçage requis (Trr) et celui Fictif (Tre).

A travers l'analyse des données portées dans le tableau de synthèse ci-dessus et celui détaillé en annexe, il se dégage les points saillants suivants :

- La pratique du rinçage du réseau après l'opération de fertigation est absente dans 13% des cas (4 cas),
- Le temps de rinçage est inférieur au temps requis de 9 à 54 % avec une moyenne de 30% et un CV de 50% dans 60% des cas. Cet état des lieux peut compromettre dans l'avenir l'uniformité de distribution au niveau de ces exploitations par bouchage progressive des goutteurs. Il est en dessus du temps recommandé de 8 à 116% avec une moyenne de 53% et un CV de 77% dans 25 % des cas.
- Seule une exploitation (soit 3% des cas) ayant respecté le temps recommandé du rinçage.

#### **IV-1-6-6 Contrôle du pH de la solution fille**

Les sols de la zone d'étude sont caractérisés par des pH alcalins, variant de 8.1 à 8.9 (pH= 8.02 pour le mois de Février 2016, ORMVAT 2016). Cette situation conjuguée à la pratique d'une fertigation non contrôlée ne peut que compromettre l'assimilation des éléments fertilisants par les racines des plantes (pH optimal 5.5 à 6.5, Mounaime 2016). La pratique d'acidification du milieu par l'apport d'acide pur à raison de 2 à 5% en volume, soit 2 à 5 l/m<sup>3</sup>eau (acide nitrique de commerce 36° Baumé, densité 1.33 ou acide chlorhydrique (Penadile

Y. (1998)) au moment de la fertigation est quasiment absente. Ces apports peuvent aussi lutter contre le colmatage des distributeurs par dépôt de calcaire.

#### **IV-1-7 Contrôle des pressions.**

Le contrôle a concerné :

- La Pression à l'entrée de la prise bloc est de 4 bars (régulateur de pression amont) pour l'ensemble des propriétés.
- La Pression à la sortie de la prise bloc est de 3 bars (régulateur de pression aval) pour l'ensemble des propriétés.
- Pression à l'entrée des prises propriétés est de 2 bars en moyenne (régulateur de pression aval) pour l'ensemble des propriétés.
- Différence de pression à l'entrée et à la sortie des filtres qui dépasse parfois 0.3bar (3% des cas) suite au début de colmatage des filtres nécessitant ainsi un nettoyage.
- Pression à l'entête de la parcelle oscillant entre 1.2 et 1.6 bar avec une moyenne de 1.35 bar, un Ecart type de 0.08 et un coefficient de variation de 5.75%.
- Pression à la queue des rampes défavorisées ayant enregistré des surpressions (6% des cas) atteignant 1.25 bar et des chutes de pression descendant jusqu'à 0.9 bar dans les 10% des cas. Cette situation est expliquée par le non-respect par certains propriétaires du nombre de secteurs à faire fonctionner simultanément comme mentionné sur les plans d'étude de l'installation. Le reste des propriétés a enregistré des valeurs normales de pression de l'ordre de 0.9 à 1 bar.

La variation moyenne de pression des distributeurs entre l'amont (point le plus favorisé) et l'aval (le point le plus défavorisé), comme le montre le tableau ci-après, est de 12% et n'excède guère la valeur admise pour une installation correctement conçue (20%). La fluctuation moyenne de pression entre l'entrée du filtre monté à l'aval du système d'injection « venturi » de la station de tête et sa sortie est de 0.15 bar avec un coefficient de variation de 46% comme le stipule le tableau ci-dessous.

**Tableau 27:** Variation de la pression moyenne au niveau des émetteurs

	<b>Goutteurs</b>				<b>%</b>
	<b>Pression moyenne en (bar)</b>				
	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>Moyenne</b>	<b>Perte charge</b>	<b><math>\Delta P/P(*)</math></b>
Min	1,00	0,90	0,95	0,05	
Max	1,15	0,99	1,07	0,21	
Moyenne	1,10	0,96	1,03	0,13	12
Ecart type	0,03	0,02	0,02	0,03	
CV(%)	3,10	2,39	2,26	25,77	

(\*)  $\Delta P : (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\max}$

La variation de la pression moyenne à l'entête de parcelle et au niveau du filtre de la station de tête est illustrée dans le tableau ci-après. Il se dégage ce qui suit :

- L'existence de pertes de charges en cours de route
- La pression moyenne de l'ensemble des parcelles est jugée normale, ce qui assure un fonctionnement normal des goutteurs,
- La perte de charge entre l'entrée du filtre et sa sortie est faible (<0.5 bar), ce qui écarte le problème de colmatage du système de filtration.

**Tableau 28 :** Variation de la pression moyenne en tête de parcelle et Au niveau du filtre

	<b>Tête de parcelle</b>	<b>Filtre</b>		
		<b>Entrée</b>	<b>Sortie</b>	<b>Ecart</b>
<b>Moyenne</b>	1,35	1,91	1,77	0,15
<b>E. Type</b>	0,08	0,08	0,1	0,07
<b>CV(%)</b>	5,75	4,06	5,63	46,46

#### **IV-1-8 Maintenance et entretien du matériel d'irrigation**

La faible section de l'orifice de passage de l'eau à travers les distributeurs, nécessite quelle que soit la qualité de l'eau une filtration adaptée au distributeur utilisé et un entretien et une maintenance efficace et régulière du réseau d'irrigation. La filtration est à cet effet, une composante essentielle du système d'irrigation localisée et son niveau et sa qualité influencent directement la qualité des arrosages et la durée de vie des distributeurs en évitant la formation de croutes d'impureté générant un risque de colmatage du système. Les eaux d'irrigation superficielles provenant du barrage Bin El Ouidane sont aptes à l'irrigation des cultures et ne contient pas d'éléments grossiers du fait de la filtration à quatre niveaux : Préfiltration à l'entête de l'adducteur par le biais d'un dégrilleur automatique et un filtre à tambour, à la station de filtration collective dotée d'une batterie de filtre à tamis de 125 microns dont le nettoyage automatique est déclenché par un Pressostat en fonction de la perte de charge entre l'entrée et la sortie du filtre à tamis fixée à 0.5 bar, au niveau de la prise bloc (PB) par le chasse pierres et à la station de tête de la propriété assuré par une série de filtre : hydrocyclone, filtre à sable et filtre à disque. Toutefois, ces éléments dissouts dans l'eau peuvent dans des conditions déterminées, précipiter réduisant ainsi la section d'écoulement aussi bien dans les conduites qu'au niveau des distributeurs. Ainsi, certaines précautions doivent être prises en compte notamment l'entretien et la maintenance du système d'irrigation pour augmenter la durée de vie de l'installation.

Les résultats issus de cette évaluation montrent que la quasi-totalité des exploitations enquêtées ne pratiquent pour l'instant aucune opération d'entretien et de maintenance du système d'irrigation, à l'exception d'une minorité (19% des cas) procédant tantôt à des purges de conduites (rampes et portes rampes) et parfois à un nettoyage des filtres de la station de tête. Face à cette situation et pour péreniser le système d'irrigation, les agriculteurs doivent être sensibilisés de l'intérêt des opérations d'entretien et de maintenance et encadrés pour maîtriser ces techniques

#### **VI- PERFORMANCES AGRO-ECONOMIQUES**

Pour évaluer les niveaux de performances agronomiques et économiques post projet, des enquêtes technico-économiques ont été effectuées auprès des différentes exploitations objet de la présente étude. Les données collectées sont à la base de la production des différents indicateurs classiques comme :

- La marge brute par culture et par hectare assolé et par assolement moyen pratiqué
- La valeur ajoutée à l'hectare assolé et par assolement moyen adopté,

- La valorisation du mètre cube d'eau apporté par culture et par assolement moyen pratiqué,
- L'efficacité agronomique de l'eau et le ratio coût-bénéfice. Ces paramètres ont été calculés en se basant sur les données issues des déclarations des agriculteurs lors des enquêtes (coût des intrants, matériel, main d'œuvre, les rendements et le prix des productions).

## **VI- 1 Analyse à l'échelle de l'exploitation (assolement moyen)**

Le tableau ci-après relate les principaux indices d'efficacité agro-économiques des exploitations agricoles évaluées par assolement moyen pratiqué et par classe de propriétés arrêtées. Les propriétés ont été catégorisées sur la base des ratios outputs/inputs réalisés. Harbouze R. et al. (2009), ont rapporté l'existence d'une certaine cohérence entre ce ratio et les niveaux d'efficacité des exploitations étudiées au périmètre du Gharb. Ainsi, trois classes ont été identifiées : C1 (ratio  $\leq 2$ ), C2 ( $2 < \text{ratio} < 2.5$ ), C3 (ratio  $\geq 2.5$ ) comme le montre le tableau de synthèse ci-dessous.

**Tableau 29** : Indicateurs agro-économiques moyens par classe D'exploitation agricole

<b>Classes</b>	<b>PB dh/ha</b>	<b>MB (Dh/ha)</b>	<b>VA (Dh/ha)</b>	<b>Ve (Dh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Outputs /Inputs</b>	<b>Va m<sup>3</sup>/ha</b>	<b>RDT (Kg/ha)</b>	<b>EUE (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Total charges</b>
<b>C1</b>	43625	28081	33504	2,6	1,7	12703	44432	4	20044
<b>C2</b>	42607	29875	34651	3,6	2,3	8064	42555	5,4	12072
<b>C3</b>	47785	35166	39428	4,9	2,8	7286	45780	6,4	18871

**PB** : Produit Brut ; **MB** : Marge Brute ; **VA** : Valeur Ajoutée ; **Ve** : Valorisation eau

**EUE** : Efficacité d'Utilisation de l'Eau ; **RDT** : Rendement ; **Va** : Volume apporté

L'analyse des données portées dans le tableau de synthèse ci-dessus et celui détaillé porté en annexe montre que les indicateurs de performance agro-économiques obtenus diffèrent d'une exploitation à l'autre, chose qui peut être imputée au :

- Niveau de technicité des agriculteurs notamment en matière de conduite des cultures ;
- Objectifs de production (en vert ou en sec) et le choix des systèmes de culture pratiqués (exigences en eau d'irrigation, cycle cultural, productivité, écoulement et prix sur le marché...)

Ainsi, et à l'échelle de l'exploitation, les valeurs moyennes réalisées à l'hectare par indicateur agro-économique se situent autour de 52000 DH, 35000 DH, 41000 DH, 4.62 Dh/m<sup>3</sup>,

43400 kg/ha, 5.82 kg/m<sup>3</sup> et 2.71 respectivement pour le Produit Brut ; la Marge Brute ; la Valeur Ajoutée, la valorisation de l'eau, le rendement, l'efficacité d'Utilisation de l'Eau et le ratio entre les produits et les inputs.

L'analyse des résultats de la typologie des exploitations montre que les ratios produits-inputs les plus élevés (classe C3) sont généralement dégagés par celles qui consomment moins d'inputs à l'hectare (ratio moyen de 2.8) mais génèrent des produits à l'hectare les plus élevés (48000 Dh/ha). Ces exploitations sont moins consommatrices en eau d'irrigation (7300 m<sup>3</sup> /ha) et le valorisent mieux à hauteur de 5 DH/m<sup>3</sup> et 6.4 kg/m<sup>3</sup>. Ces exploitations sont qualifiées d'efficaces puisqu'elles produisent plus d'outputs avec proportionnellement moins d'inputs. La classe des exploitations C1 a enregistré les plus faibles valeurs du ratio produits/inputs atteignant 1.7, ce qui signifie que l'agriculteur a produit un bénéfice équivalent à 17/10 des charges de production dépensées comparativement à la classe C3 ayant généré un produit valant 28/10 des inputs. Ces résultats se traduisent par une forte consommation en eau d'irrigation (12700 m<sup>3</sup>/ha) et une faible valorisation de l'eau (2.6 DH /m<sup>3</sup> et 4 Kg/m<sup>3</sup>). Ces exploitations inefficaces utilisent plus d'inputs par hectare sans pour autant produire plus d'outputs.

## **VI-2 Analyse à l'échelle de la culture**

En analysant les scores obtenus par spéculations comme relaté sur le tableau de détail en annexe, il ressort que les systèmes de culture à base d'agrumes, betterave à sucre, maïs fourrager et maraichage (niora, oignon, melon, menthe et courgette) produisent les valeurs ajoutées les plus élevées (42250 à 73822 DH/Ha), avec une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation (2.3 à 9 DH/m<sup>3</sup> et 5 à 11 Kg/m<sup>3</sup>). Ce type d'exploitation se caractérise par une utilisation intensive des facteurs de production du fait de leurs capacités de se diversifier largement et intensifier leurs modes de production, chose favorisée par la disponibilité de l'eau et qui est à la demande. A l'opposé, les systèmes de production à base petit pois fourrager, orge fourrager, céréales et la fève ont peu de choix de diversification et jouent davantage sur la gestion des intrants (gestion orienté vers l'économie des intrants, ce que nous appelons communément la gestion par les charges).

Le tableau ci-après donne les valeurs moyennes des indicateurs agro-économiques évalués des principales spéculations confondues.

## **V- Changements engendrés par la reconversion à l'irrigation localisée**

Dans cette partie, nous allons mettre en exergue les changements ayant eu lieu au sein des exploitations ayant installé le système de goutte à goutte , ainsi que l'impact de la reconversion

collective à l'irrigation localisée sur un certain nombre de paramètres notamment l'utilisation des eaux sous terraines, la qualité des eaux de la nappe et la mise en valeur agricole au niveau de la zone étudiée tout en analysant les aspects relatifs aux systèmes de cultures pratiqués par les agriculteurs, le degré d'intensification culturale, la valorisation de l'eau d'irrigation par le matériel végétal adopté et la commercialisation des productions.

L'analyse des premières données, montre que ces changements sont en générale progressifs mais néanmoins perceptifs dès la première année.

## **V-1 Effet de la transition sur l'utilisation de l'eau d'irrigation**

### **V-1-1 Economie de l'eau d'irrigation.**

Dans cette partie nous allons procéder à une comparaison des consommations à deux niveaux : A l'échelle des volumes d'eaux superficielles facturées et de l'utilisation conjuguée des eaux de surface et des eaux souterraines.

### **V-1-2 Volumes facturés**

La facturation concerne uniquement les eaux de surface provenant du barrage Bin el Ouidane. Les rôles de la redevance eau d'irrigation édités par les services techniques de l'ORMVAT ont constitué les documents de base pour effectuer la présente évaluation. Le dépouillement et l'analyse des consommations facturées par exploitation objet de l'observatoire de suivi a permis de montrer, comme stipulées dans le tableau et le graphique ci-dessous, une augmentation des volumes facturés de l'ordre de 47% en passant de l'irrigation classique (situation d'avant-projet) à l'irrigation localisée (situation post-projet). Ces résultats corroborent parfaitement avec ceux obtenus par Mengoub F.Z et al., en 2014, ayant évalué l'impact économique de la politique de reconversion des systèmes d'irrigation gravitaires en système d'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla dans la zone des Beni Moussa et soulignant qu'après la reconversion, l'utilisation de l'eau de surface augmentera de 51%, alors que celle des eaux souterraines baissera de 28%. Les déclarations des agriculteurs vont dans ce sens et confirment la volonté de privilégier l'utilisation des eaux de surface disponibles actuellement au moindre coût et de meilleure qualité. La quantité moyenne consommée par hectare assolé est de 5539 et 8131 m<sup>3</sup> respectivement pour la situation d'avant-projet et la situation d'après-projet. Fusillier et Saque (2001) cité par Petitguyot T. et al., (2004) ont rapporté ainsi des situations dans lesquelles la consommation en eau à l'hectare a augmenté avec des techniques d'irrigation localisée, en raison d'une mauvaise maîtrise technique. Cette surconsommation s'est traduite sur le terrain par une diversification et une intensification



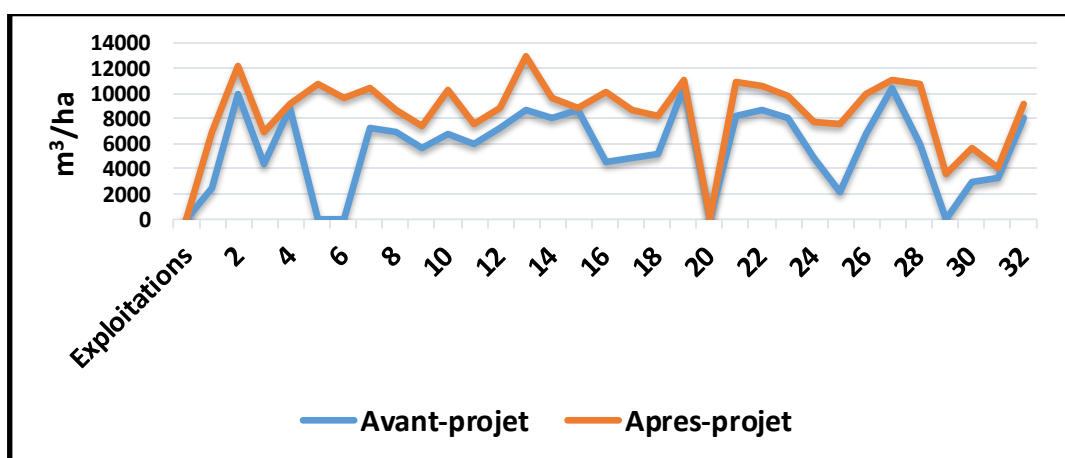
culturelle des exploitations reconverties collectivement à l'irrigation localisée. Belghiti, 2009 a rapporté dans ce sens que le véritable gisement d'économie d'eau dans des situations de stress hydrique se situe au niveau de l'amélioration de la productivité et de la valorisation de l'eau. En d'autres termes, il s'agit de produire davantage de richesse (de production agricole, de valeur ajoutée, d'emplois par m<sup>3</sup> d'eau ».

**Tableau 30:** Etat comparatif de la consommation moyenne à l'hectare de La situation d'avant et après le projet.

Eau de surface				
Avant-projet		Après-projet		Ecart
m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /Ha	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /Ha	(%)
1039950	5539	1526673	8131	47

La figure ci-après illustre clairement le dépassement de la consommation moyenne à l'hectare après le projet des exploitations objet de la présente étude. Comme déjà signalé, cette surconsommation est expliquée en grande partie par l'intensification culturelle et dans une moindre proportion par la régie des irrigations par les agriculteurs encore imprégnés de l'ancienne technique classique d'irrigation gravitaire.

Ces résultats préliminaires ne peuvent être extrapolables à l'ensemble du périmètre car ils ne concernent qu'un échantillon réduit d'usagers agricoles de la zone pilote et ne peuvent en aucun cas donner d'indication sur la zone toute entière.



**Figure 25 :** Utilisation des eaux de surface

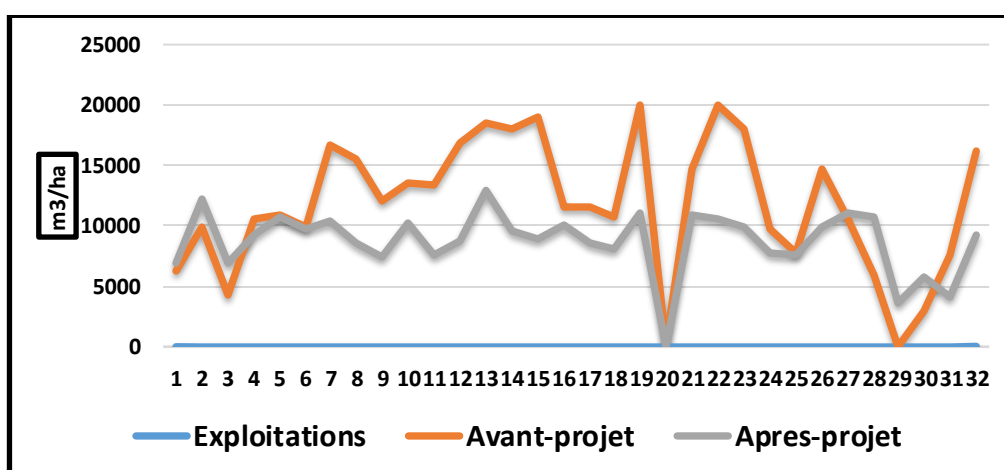
### V-1-1-3 Utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines

En analysant les données déductibles du fichier de facturation pour les eaux de surface provenant du barrage et de la déclaration des propriétaires des exploitations objet de l'enquête sur l'usage des eaux souterraines, il se dégage, comme porté dans le tableau ci-dessous, une économie substantielle en eau d'irrigation de l'ordre de 30%.

**Tableau 31** : Utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraines

Usage conjugué eaux de surface et de nappe				
Avant-projet		Après-projet		Ecart (%)
m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /Ha	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /Ha	
2166192	11537	1526673	8131	<b>-29,52</b>

L'économie d'eau enregistrée en passant du système d'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée comme relaté sur la figure ci-dessous, est expliquée par un renoncement des usagers agricoles à l'usage des eaux de la nappe. Cette transition assortie d'un recul important en matière des prélèvements d'eau d'irrigation à partir de la nappe en complément à l'eau du barrage, est compensée en partie par une augmentation de la consommation en eaux de surface. Ces résultats prouvent bien l'atteinte des objectifs initiaux qui consistaient en la promotion de la durabilité de l'usage de l'eau d'irrigation traduite en termes de diminution des exportations de l'eau de la nappe.



**Figure 26** : Variation de l'usage conjuguée des eaux de surface et souterraines Entre la situation de référence 2014 et celle d'après le projet 2016

A la lumière de l'analyse de l'effet de la transition à l'irrigation localisée sur la consommation en eau, il convient de signaler un recul très significatif sur les exportations à partir de la nappe tout en assistant à une forte consommation des eaux de surface expliqué par l'intensification culturale. Si la nappe constitue un gisement important d'économie de l'eau, un manque à gagner substantiel réside en fait au niveau du réseau d'irrigation et à la parcelle. Ainsi, il va de soit d'assortir l'appui au développement à l'irrigation localisée de garde-fous (Cultures efficaces pour l'eau d'irrigation, quotas annuels, tarifs dissuasifs et régie optimale des irrigations) pour mieux parer aux risques de pénurie et prévenir le risque de perte du capital humain et matériel investis.

#### **V-1-1-4 Utilisation des eaux souterraines**

La reconversion collective des systèmes d'irrigation gravitaire existants en systèmes d'irrigation localisée ambitionne de réduire la pression sur les eaux souterraines par une baisse de consommation d'eau de la nappe. Le projet a été initialement conçu pour une utilisation exclusive de l'eau de surface provenant du barrage Bin El Ouidane. Toutefois, certains usagers agricoles (41 % des cas de l'échantillon étudié) ont procédé à un raccordement de leur station de tête aux eaux de la nappe pour une éventuelle utilisation en cas d'orages survenant en amont du périmètre de la reconversion entraînant une surcharge de l'eau au niveau du barrage le rendant plus turbide ne se prêtant pas à l'irrigation localisée (problème de bouchage des filtres et colmatage des goutteurs) et en cas d'arrêt subit du lâcher d'eau d'irrigation à partir de l'usine ONE d'Afourer (pannes imprévues). Durant la période d'étude, ces incidents particuliers ont été de courte durée et par conséquent les irrigants n'ont pas eu recours au pompage des eaux souterraines pour apporter le complément d'eau d'irrigation.

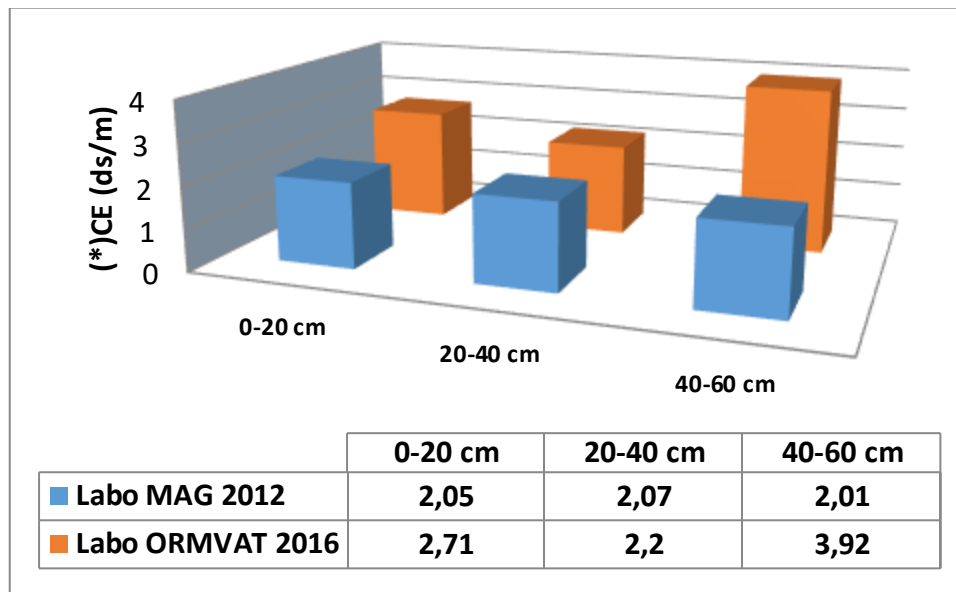
#### **V-2- Effets sur les paramètres environnementaux**

Les données relatives à l'analyse du sol et de l'eau d'irrigation des sites concernant les premiers secteurs mis en eau de la zone de reconversion collective ont été récupérées du laboratoire d'analyses de l'ORMVAT (2014 et 2016) et dépouillées et ce dans l'optique de voir si la transition à l'irrigation localisée a un effet sur l'évolution de certains paramètres environnementaux. La situation de référence réalisée par le laboratoire LABOMAG en 2012 pour la caractérisation de la zone d'étude a servi comme base de comparaison avec les données actuelles.

## V-2-1 Salinité du sol

Les données post-projet afférentes à la salinité du sol mesurée par horizon, ont été comparées à celles d'avant-projet comme stipulé par la figure ci-après :

**Figure 27** : Etat comparatif de la conductivité électrique du sol par horizon  
Entre la situation de référence et celle d'après le projet  
Source données : Labomag 2012 et Labo ORMVAT 2016



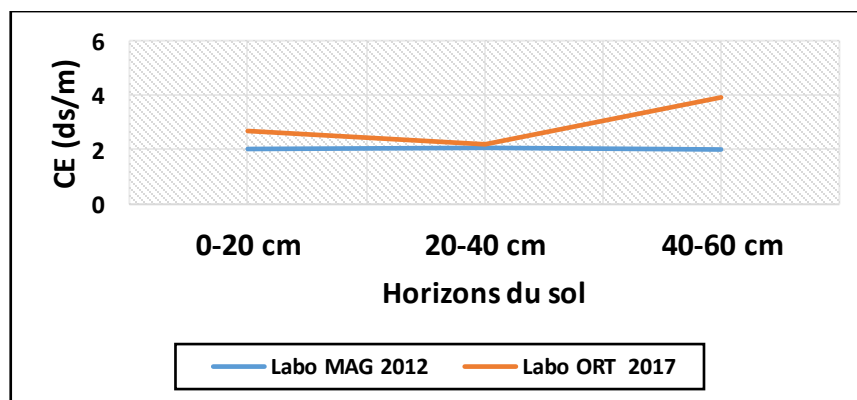
(\*) : Extrait de la pâte saturée.

Le recoupement effectué a permis de dégager les faits saillants suivants :

- Augmentation de la salinité du sol par rapport à la situation de référence due essentiellement au nouveau mode d'irrigation adopté en l'occurrence l'irrigation localisée ayant limité le lessivage des sels en profondeur contrairement à l'irrigation gravitaire utilisant des mains d'eau importantes entraînant les sels en profondeur. Cet accroissement se fait à des degrés différents selon l'horizon du sol prospecté (figure ci-dessus). L'augmentation est très palpable au niveau de l'horizon superficiel (0 – 20 cm) et celui de profondeur avec respectivement une hausse de 32% (soit +0.66 ds/m) et 95% (soit + 1.19 ds/m). L'horizon intermédiaire 20 – 40 cm a connu une légère augmentation de l'ordre de 6%, soit 0.13 ds/m. L'irrigation et l'évaporation de l'eau de la surface du sol conduisent à l'accumulation des sels, ce qui entraîne un accroissement graduel des sels dans la zone racinaire (accumulation des sels à la surface par évaporation eau : demande climatique et lessivage des sels en profondeur par irrigation). En zones d'agriculture intense comme le cas du périmètre du Tadla où l'eau d'irrigation est de bonne qualité avec un

taux de salinité moyennement faible de l'ordre de 0.52 mS/cm (CV : 2%) pour les eaux de surface et de 2 mS/cm (CV : 39 et 45% respectivement pour Février 2014 et Février 2016) comme porté dans le tableau ci-dessous, la pratique de la fertilisation reste la cause majeure et probable de la salinisation du sol et les aquifères.

- Les valeurs enregistrées quoi qu'il en soit resté en dessous des seuils de salinisation avancés par différents auteurs (4.7 dS/m Noomene H. 2011 ; jusqu'à 8 dS/m Phocaidés A. 2008) au-delà desquels la productivité des cultures est affectée (dégradation de la structure du sol et stress salin : fanaison des cultures pratiquées sur ce type de sol puisqu'elles n'arrivent plus à extraire l'eau fortement retenu par le sol suite à la présence des sels).



**Figure 28** : Fluctuation de la conductivité électrique du sol entre la Situation d'avant-projet et celle post projet.

### **V-2-2 PH du sol**

Ce paramètre traduit l'état de saturation du complexe absorbant et de la solution du sol en actions échangeables ou solubles. Les valeurs du pH enregistrées actuellement restent dans la gamme des sols moyennement basiques à tendance alcaline contre des valeurs moyenne de 8.1 à 8.8 en situation de référence de 2012 (Labomag, (2012)), chose qui peut poser des problèmes d'assimilation des éléments minéraux comme le fer, le magnésium et le zinc par les plantes et dont il faut tenir compte dans la pratique de la fertilisation.

### **V-2-3 Qualité des eaux souterraines**

Le tableau ci-après relate l'état comparatif de la qualité de l'eau de la nappe de différents sites de la zone de reconversion collective à des périodes différentes.

**Tableau 32** : Evolution de la qualité des eaux de la nappe entre 2014 et 2016

Source données : Labo ORMVAT (2017)

Sites	Situation avant- projet Février 2014					Situation après – projet Février 2016				
	CE	Cations				Cations				CE
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		
	mS/cm	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	mS/cm
1	1,40	6,00	7,00	1,20	0,03	6,00	4,00	3,99	0,03	1,53
2	3,20	5,00	19,00	17,25	0,18	5,00	23,00	13,77	0,23	3,19
3	2,10	5,00	14,00	2,50	0,01	9,00	13,00	7,68	0,01	2,23
4	1,20	3,20	7,80	0,81	0,01	3,00	3,40	2,25	0,01	0,80
5	2,20	5,00	15,60	2,20	0,01	9,00	19,00	8,12	0,01	2,41
<b>Moyenne</b>	<b>2,02</b>	<b>4,84</b>	<b>12,68</b>	<b>4,79</b>	<b>0,04</b>	<b>6,40</b>	<b>12,48</b>	<b>7,16</b>	<b>0,06</b>	<b>2,03</b>
	Anions					Anions				
	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l
1	5	0,88	1,00	5,90	0,88	6,25	1,13	0,00	6,40	0,79
2	25	0,81	2,80	12,50	0,03	28,00	0,40	0,00	14,00	0,00
3	10	1,10	1,00	8,20	0,71	16,50	3,45	0,00	10,00	0,60
4	4	1,14	1,20	5,90	0,27	3,00	0,80	0,00	5,00	0,12
5	13	0,78	1,00	7,00	0,40	21,50	4,77	0,00	10,00	0,32
<b>Moyenne</b>	<b>11,40</b>	<b>0,94</b>	<b>1,40</b>	<b>7,90</b>	<b>0,46</b>	<b>15,05</b>	<b>2,11</b>	<b>0,00</b>	<b>9,08</b>	<b>0,37</b>

Il est difficile de lier les variations enregistrées entre la situation de référence et celle d'après-projet en termes de composition chimique des eaux souterraines de la zone d'étude au seul facteur de la reconversion collective à l'irrigation localisée du fait de la multitude des facteurs qui influencent la qualité des eaux de nappe. Selon Couture G, 1997, les roches sont susceptibles de conférer une signature géochimique aux eaux souterraines qui y circulent. La qualité de l'eau souterraine est également régie par le milieu naturel en plus des sources de contamination anthropique concourant à diminuer la qualité de l'eau consommé. De son côté Ghesquière O. 2015, a rapporté que cinq principaux facteurs influencent la géochimie des eaux souterraines i) la recharge par les eaux de précipitations récentes, ii) les interactions géochimiques eau-roche, iii) les échanges ioniques, iv) la présence d'aquitards d'argile marine

ou d'intrusions d'eau salée et v) les connexions hydrauliques entre le socle rocheux et les dépôts granulaires surfaciques.

#### **V-2-4 La salinité de l'eau :**

La conductivité électrique de l'eau de nappe a enregistré une augmentation de 0.59 %, soit 0.01 mS/cm (passage de 2.02 à 2.03 ms/cm). Malgré cette augmentation, la salinité reste faible à moyenne et ne constitue pas à l'heure actuelle une contrainte majeure en irrigation localisée. L'analyse des données selon la nature des ions a permis de dégager les constatations suivantes :

##### **V-2-4-1 Cations :**

Globalement on note une augmentation de la teneur moyenne en ions calcium, sodium et potassium des eaux souterraines entre 2014 et 2016 respectivement de (32, 49 et 25 %, respectivement, soit 1.56, 2.37 et 0.01 meq/l). L'ion magnésium a au contraire enregistré une diminution de l'ordre de 0.2 %, soit 1.58 meq/l.

##### **V-2-4-2 Anions :**

Les ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  ont connu une élévation de la concentration de 32, 123, et 14 % respectivement (soit 3.65, 1.17 et 1.18 meq/l). Les ions  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  ont connu au contraire une baisse de la teneur moyenne de l'ordre de 100 et 20 % respectivement (soit 1.4 et 0.09 meq/l). La teneur moyenne en nitrates enregistrée actuellement est de l'ordre de 0.37 meq/l, soit 22.57 mg/l, ce qui classe cette eau dans la gamme de qualité moyenne (entre 25 et 50 mg/l ; Labomag (2012.)).

L'effet des sels solubles sur le sol a été abordé à travers :

##### **V-2-5 Les risques liés au sodium :**

En forte teneur dans l'eau d'irrigation, cet élément peut présenter un risque de perméabilité du sol (dispersion des agrégats du sol et dégradation de sa structure) et peut aussi augmenter le pH du sol et réduire la disponibilité de certains micronutriments aux plantes comme le phosphore et le fer (Phocides A. (2008)). Dans notre cas, avec des concentrations en calcium et magnésium élevées par rapport au sodium le risque de perméabilité des sols ne se pose pas pour le moment (Taux d'Adsorption du sodium : SAR Vale 2.33 et reste inférieur à la norme de 15 écartant donc tout risques liés au sodium « sodisation des sols », Phocides A. (2008)). On ne distingue pas à l'heure actuelle dans la zone des signes

marquants de salinité des sols en surface ni de problème de destruction de la structure du sol par alcalinisation (conductivité électrique moyenne de 2 mS/cm et faible SAR de 2.33).

$$\text{NB : SAR} = \text{Na}^+ * [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / 2]^{-1/2}$$

Ca, Mg et Na en meq/l

### **V-2-6 Carbonate de sodium résiduel**

Ce paramètre est défini comme étant la différence entre les ions bicarbonates et les ions calcium et magnésium. Il vaut dans notre cas une valeur négative (-9.8) donc inférieure à 1.25 meq/l (Phocaidès A. (2008)) à partir de laquelle l'eau devienne dangereuse (le calcium et le magnésium peuvent réagir avec le bicarbonate et précipitent sous forme de carbonate, la concentration relative en sodium dans le complexe échangeable augmente et provoque la dispersion du sol).

### **V-2-7 Le pH de l'eau :**

L'eau souterraine est légèrement basique avec un pH moyen de 7.68 restant dans la fourchette des valeurs moyennes enregistrées en 2012 dans la même zone (entre 7 et 8, Labomag, (2012)) et dans la norme des valeurs de qualité de l'eau d'irrigation (entre 6.5 et 8.4, Phocaidès A. (2008)).

### **V-2-8 Profondeur de la nappe :**

Les données moyennes du niveau statique (moyenne : 15.15 m, ET : 2.85 et CV : 22.67%) des points de prélèvement de l'eau d'irrigation à partir de la nappe phréatique de l'échantillon étudié en 2016 au niveau des premiers secteurs mis en eau dans la zone de reconversion ont été comparées à celles d'avant-projet en 2014 (moy : 12.56 m, ET : 2.94 et CV : 19.44%). Il ressort un rabattement de 2.59 m dû essentiellement à l'irrigation localisée ayant limité l'infiltration de l'eau vers la nappe. Hammani A. (2015) a rapporté dans ce sens que l'irrigation contribue à raison de 71% à la recharge de la nappe des Beni Moussa, constituant ainsi, la principale source d'alimentation de l'aquifère. Les prélèvements par pompage privé représentent 66% des sorties totales de la nappe.



### **V-3 Impacts sur les systèmes de culture pratiqués**

#### **V-3-1 Emblavements cultureaux**

L'évolution de l'occupation du sol entre la situation de référence d'avant-projet et la situation actuelle comme illustré sur le tableau ci-après montre que la reconversion collective à l'irrigation localisée des systèmes d'irrigation gravitaire a eu un impact positif sur les emblavements cultureaux. En effet, ce nouveau mode de gestion souple a incité les agriculteurs à occuper davantage leurs sols en pratiquant aussi bien les cultures principales têtes d'assolement que les cultures dérobées en fin de saison. Le tableau ci-après donnant la part des cultures dans l'intensification culturelle dénote une augmentation moyenne des emblavements toutes spéculations confondues de 18% à l'exception des céréales ayant reculé de 7% par rapport à la situation de référence cédant la place aux spéculations à forte valeur ajoutée comme les fourrages et le maraichage.

**Tableau 33** : Evolution des occupations de sol

Cultures	Avant-projet	Situation actuelle	Variation
	(Ha)	(Ha)	%
<b>Betterave à sucre</b>	42,40	43,10	2
<b>Céréales automne</b>	38,40	35,60	-7
<b>Agrumes</b>	7,00	7,00	0
<b>Olivier</b>	22,17	23,20	5
<b>Luzerne</b>	35,20	38,60	10
<b>Mais fourrager</b>	7,10	17,90	152
<b>Autres fourrages</b>	3,60	7,85	118
<b>Maraichage</b>	38,20	42,85	12
<b>Autres</b>	4,70	19,30	311
<b>SAU assolée (ha)</b>	198,77	235,40	18

L'analyse des assolements pratiqués par les agriculteurs objet de l'étude, montrent un maintien des anciennes spéculations initialement pratiquées avec l'irrigation gravitaire, apportant un revenu plus stable, comme le cas de la betterave à sucre, les céréales d'automne, la luzerne et l'arboriculture (olivier et agrume) et s'accaparant respectivement de 23, 19, 21 et 17 % de l'assolement global. Ce choix s'explique par la facilité d'écoulement des productions de ces cultures sur le marché :

-La betterave à sucre a un débouché garanti par les sucreries du Tadla assurant aussi bien la prestation d'encadrement des betteraviers, la fourniture des intrants et la collecte de la production.

-Les céréales sont facilement écoulees au niveau du marché local alors que les productions en semences de multiplication entreprises dans un cadre contractuel sont collectées par la Société Nationale de Commercialisation des Semences (SONACOS).

-La luzerne constitue la principale culture fourragère adoptée par les agriculteurs de la région. Elle est écoulee sous forme de foin pour satisfaire les besoins d'affouragement surtout en périodes de soudure ou utilisée en vert par le bétail essentiellement les vaches laitières pour la production du lait. Cette production est considérée aux yeux des agriculteurs comme un revenu couvrant les frais d'affouragement du bétail.

-L'arboriculture constituée essentiellement de l'olivier en inter sol et les agrumes est facilement écoulee pour des fins de trituration des huiles d'olive et de consommation ou de transformation (olives de table et jus d'agrumes).

Concernant la diversification culturelle, on note une augmentation progressive des emblavements en fonction des opportunités qu'offre le marché des filières porteuses et à forte valeur ajoutée valorisant au mieux l'eau d'irrigation. Parmi ces spéculations nous citons le maraichage de saison comme la culture du niora, le sésame, la courgette, le haricot vert et les cucurbitacées (melon et pastèque). Les cultures maraichères sont en effet relativement risquées car les prix varient avec une forte amplitude d'une année à l'autre et au cours de la même année. A cet effet, les producteurs se sont organisés en coopératives notamment pour le sésame et la niora pour écouler facilement leurs productions et tirer profit des prix intéressants qu'offre le marché. Ce regroupement des agriculteurs mettra fin à la spéculation par les intermédiaires profitant plus au détriment des producteurs.

Le changement dans l'orientation des exploitations agricoles est expliqué par le fait que le passage au système d'irrigation localisée assure une bonne maîtrise des quantités d'eau disponibles et donc une régularité des apports d'eau. Ceci permet aux agriculteurs d'augmenter l'assolement même des espèces plus sensibles au stress hydrique.

### **V-3-2 Intensification culturelle**

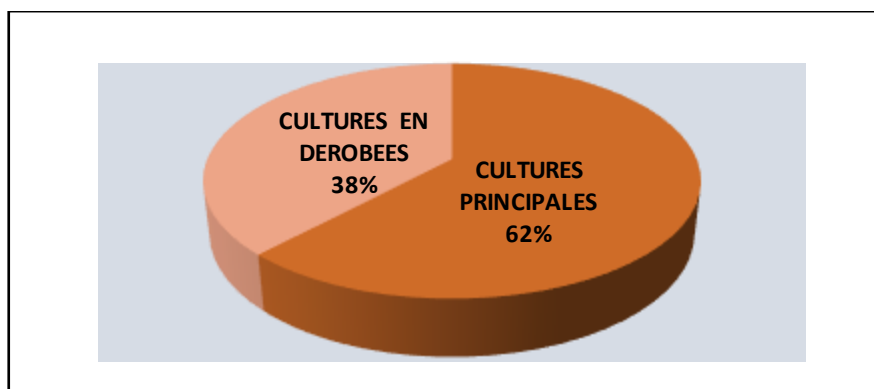
Le tableau ci-dessous retrace l'évolution du TIC lié directement à la disponibilité de la ressource en eau et donne une situation comparative des valeurs du Taux d'Intensification cultural (TIC) au niveau de différentes exploitations agricoles étudiées avant et après le projet de reconversion collective. Il dénote clairement une tendance à la hausse du TIC de 18%

environ pour la plupart des spéculations notamment le maïs fourrager et le maraichage ayant gagné respectivement 6 et 10 points au détriment des spéculations classiques (céréales d'automne et la betterave à sucre) qui ont régressé de 1 point chacune. La situation reste stationnaire pour l'arboriculture constituée essentiellement des agrumes et de l'olivier.

**Tableau 34** : Evolution de la part de chaque culture dans l'intensification Culturelle.

CULTURES	TIC (%)		Ecart %
	Avant-Projet	Après-Projet	
Betterave à sucre	23	22	-1
Céréales d'automne	20	19	-1
Agrumes	4	4	0
Olivier	12	12	0
Luzerne	19	21	2
Maïs fourrager	4	10	6
Maraichage	23	33	10
Autres	2	4	2
<b>TOTAL</b>	<b>107</b>	<b>125</b>	<b>18</b>

L'analyse du tableau de comparaison entre la situation de référence d'avant-projet et la situation actuelle a permis de dégager que la reconversion collective à l'irrigation localisée des systèmes d'irrigation gravitaire a eu un impact positif sur l'intensification culturelle. En effet, ce nouveau mode de gestion souple de l'irrigation à la demande introduit dans la zone, représente un intérêt économique pour l'irrigant, lui permettant de sécuriser ses apports d'eau, de réduire les pertes d'eau dans les réseaux d'irrigation et à la parcelle, et en conséquence de quoi, inciter les agriculteurs à occuper davantage leurs sols en pratiquant aussi bien les cultures principales têtes d'assolement que les cultures dérobées en fin de saison. Le graphique ci-après donne la part des cultures dans l'intensification culturelle.



**Figure 29** : Part des cultures dans l'intensification culturelle

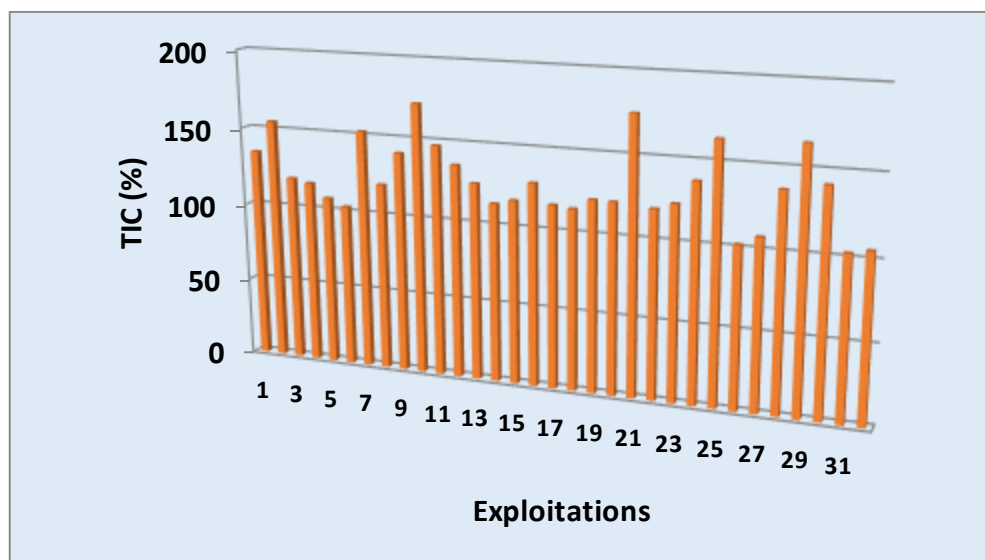
Le tableau ci-dessous donne la part de chaque type de culture aussi bien dans l'assolement global de l'échantillon des exploitations étudiées que dans le TIC global. Il ressort que les spéculations tête d'assolement prédominent en occupant respectivement 78 et 62% des emblavements globaux et l'intensification culturelle, alors que les cultures en dérobées ne détiennent que 47 et 38% respectivement.

**Tableau 35** : Part des cultures dans l'assolement globale

CULTURES	%	
	Sup (Ha)	TIC
<b><u>Cultures principales :</u></b>	<b><u>78</u></b>	<b><u>62</u></b>
Betterave	22	18
Céréales d'automne	19	15
Luzerne	21	16
Agrumes	4	3
Olivier	12	10
<b><u>Cultures dérobées :</u></b>	<b><u>47</u></b>	<b><u>38</u></b>
Maraichage	33	26
Mais fourrager	9,5	8
Autres fourrages	4,5	4
<b>TIC global (%)</b>	<b>124,6</b>	<b>100</b>

Le graphique ci - après illustre clairement la tendance à l'intensification (TIC actuel > TIC initial) et montre une variation entre les espèces pratiquées au niveau des exploitations

enquêtées de 90 à 195% avec une moyenne de 124.6 % (Ecart type : 23 et cv : 18 %), ce qui traduit une intensification agricole comparativement à ce qui est pratiqué initialement avec le mode d'irrigation gravitaire (T.I.C moyen ne dépasse guère les 106 %).

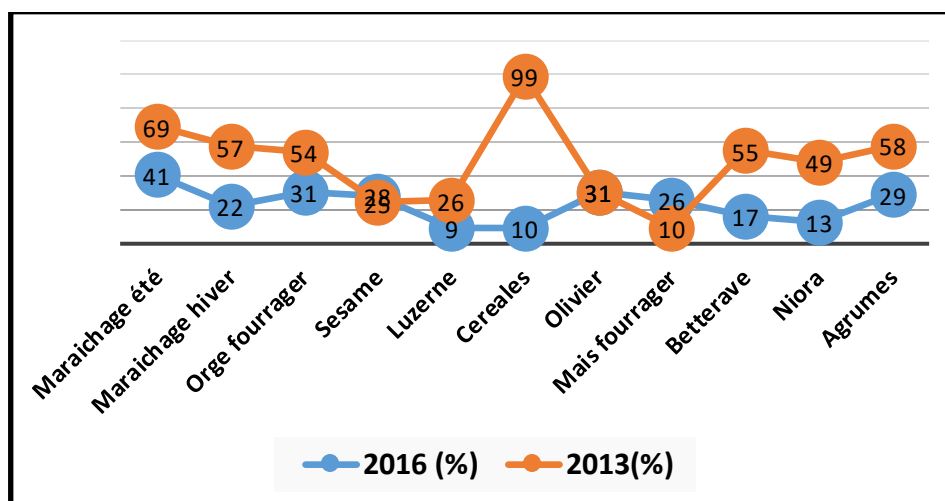


**Figure 30** : Variation du Taux d'Intensification Cultural entre Les exploitations agricoles.

#### **V-4 Main d'œuvre**

Sur le plan quantité des travaux, la nouvelle technique d'irrigation introduite a procuré une certaine aisance dans l'accomplissement des tâches d'arrosage et d'entretien de manière générale, en demandant moins d'effort physique et de mobilisation, ce qui corrobore avec ce qui a été avancé par Colaizzi et al, 2003 cité par <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole>: une installation d'irrigation goutte à goutte bien conçue demande peu de main d'œuvre. Parallèlement à ce confort, un besoin lié à la disponibilité de la main d'œuvre qualifiée émerge suite à l'intensification des systèmes de culture et à l'installation de nouvelles cultures à haute valeur ajoutée. Dans le contexte de l'expérience vécue, le poste de main d'œuvre représente la dépense la plus importante de la structure du prix de revient de presque toutes les cultures aussi bien pour la période d'après le projet que celle d'avant-projet comme porté dans le graphique ci-dessous, représentant ainsi en moyenne 25 et 49 % des charges globales (cv : 40 et 25 %) respectivement. La reconversion collective à l'irrigation localisée a donc atténué la part des charges liées à la main d'œuvre au niveau des inputs totaux. L'écart moyen entre la situation de référence d'avant-projet et celle d'après le projet est de 25

% (cv : 111 %), traduisant donc une diminution de besoin en main d'œuvre en passant du système d'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée.



**Figure 31** : Part du poste de main d'œuvre dans le coût de revient

Ces résultats confirment ceux obtenus par Bruce W, 1972 cités par Daoudi H. (2016) rapportant que les besoins en main d'œuvre sont de 1(un) ouvrier par jour pour 1,5 ha dans l'irrigation gravitaire, 1(un) ouvrier pour 2,5 ha pour l'aspersion et 1(un) ouvrier pour 40 à 60 hectares en cas d'irrigation en goutte à goutte.

## **V-5 Commercialisation des productions**

La reconversion des systèmes d'irrigation gravitaires en système d'irrigation localisée a permis aux usagers agricoles d'accorder plus d'importance à des cultures de haute valeur ajoutée dans leurs systèmes de production. A l'issue de la première année de mise en eau des secteurs reconvertis, le nouveau mode d'irrigation n'a pas affecté pour l'instant le mode de commercialisation. En effet, les agriculteurs restent fidèles à la vente sur pieds où les intermédiaires viennent à la recherche des productions. Ces derniers se chargent de la récolte, du transport et de la commercialisation des productions au marché. Les producteurs continuent à opérer selon ce schéma, vu l'importance des coûts de la récolte et du transport. A ceci s'ajoutent les prises de risque plus importantes dues à la fluctuation des prix sur les marchés et les blocages perçus sur ces marchés. Ce comportement permet aux agriculteurs de réduire les risques, mais leur fait perdre une grande marge de profit dont bénéficient souvent les intermédiaires. De cette

façon, l'agriculteur ne perçoit qu'une partie du prix de vente final vu qu'il vend à des prix dérisoires alors que les intermédiaires profitent de la plus grande marge de gain.

## **V- 6 Effets sur les indicateurs agro-économiques**

L'effet de la transition à l'irrigation localisée sur les principaux paramètres agro-économiques des exploitations enquêtées est récapitulé dans le tableau ci-après illustrant clairement la variation de ces indicateurs par rapport à la situation de référence de 2013.

**Tableau 36** : Scores des principaux indicateurs agro-économiques Réalisés entre 2016 et la situation de référence 2013

	2013					2016				
<b>Cultures</b>	<b>RDT</b>	<b>PB</b>	<b>VA</b>	<b>MB</b>	<b>VE</b>	<b>RDT</b>	<b>PB</b>	<b>VA</b>	<b>MB</b>	<b>VE</b>
<b>Céréales</b>	56	16800	9709	8624	2	75	32601	29451	24362	4
<b>Luzerne</b>	770	47793	38972	35934	3	800	32000	27800	21316	1
<b>Mais four</b>	450	31500	22260	18085	4	714	58400	48409	44909	6
<b>Betterave</b>	614	24570	18786	11996	2	871	68312	56912	47295	6
<b>Sésame</b>	6	9600	3580	1250	1	10	23034	20243	20150	2
<b>Niora</b>	180	5400	39220	30550	6	521	78000	68451	61551	6
<b>Olivier</b>	50	20000	16372	14012	1	66	32875	26175	13489	3
<b>Agrumes</b>	300	45000	36560	29290	6	600	120000	89134	76384	6

**PB** : Produit Brut (Dh/ha) ; **MB** : Marge Brute (Dh/ha); **VA** : Valeur Ajoutée (Dh/ha) ; **VE** : Valorisation eau (Dh/m<sup>3</sup> eau) ; **RDT** : Rendement (qx/ha);

Le tableau ci-après donne la variation des principaux indices agro-économiques entre l'année de référence et celle d'après le projet.

**Tableau 37** : Effet de la transition à l'irrigation localisée sur  
Les indices Agro-économiques.

Cultures	Variation (%) entre 2013 et 2016				
	RDT	PB	VA	MB	VE
Céréales	34	94	203	182	100
Luzerne	4	-33	-29	-41	-67
Mais four	59	85	117	148	50
Betterave	42	178	203	294	200
Sésame	67	140	465	1512	100
Niora	189	1344	75	101	0
Olivier	32	64	60	-4	200
Agrumes	100	167	144	161	0
<b>Moyenne</b>	<b>51</b>	<b>122</b>	<b>98</b>	<b>107</b>	<b>36</b>

Globalement on note une amélioration moyenne des principaux indices agro-économiques de la plupart des cultures de 36 à 122 % par rapport à la situation de 2013 d'avant-projet. Toutefois, la luzerne a fait l'exception malgré l'augmentation du rendement de l'ordre de 4 % par rapport à la situation de référence, les autres indices ont reculé à des degrés différents. Les facteurs pouvant expliquer cette situation résident en fait dans les prix de foin de luzerne pratiqués sur le marché (régies par la loi de l'offre et la demande) et l'importance des inputs (charges) engagés durant le cycle de production de la culture.

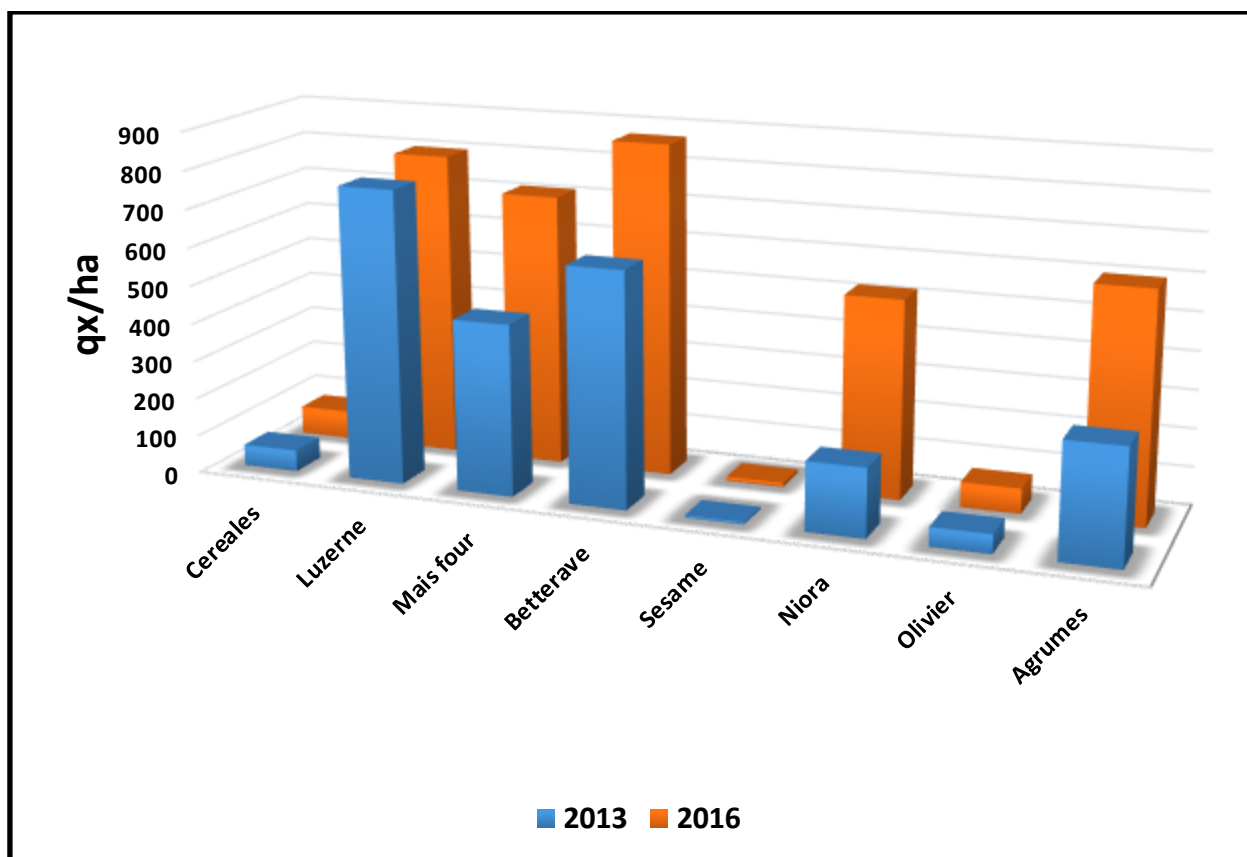
Dans ce qui suit nous procédons à une analyse par indice :

### **V-6-1 Le rendement**

La reconversion collective à l'irrigation localisée a permis d'améliorer la productivité des cultures pratiquées au travers une augmentation moyenne de la quantité produite par unité de surface de 4 à 189 % respectivement pour la luzerne et la niora, comme illustré par le graphique ci-dessous. Cette amélioration est imputée essentiellement au confort hydrique et nutritionnel procuré par la technique d'irrigation localisée contrairement à l'ancienne technique d'irrigation gravitaire où l'agriculteur est à la merci du tour d'eau pour arroser ses cultures avec des coupures opérées entre les lâchers imposés par le souci de modulation des dotations sur



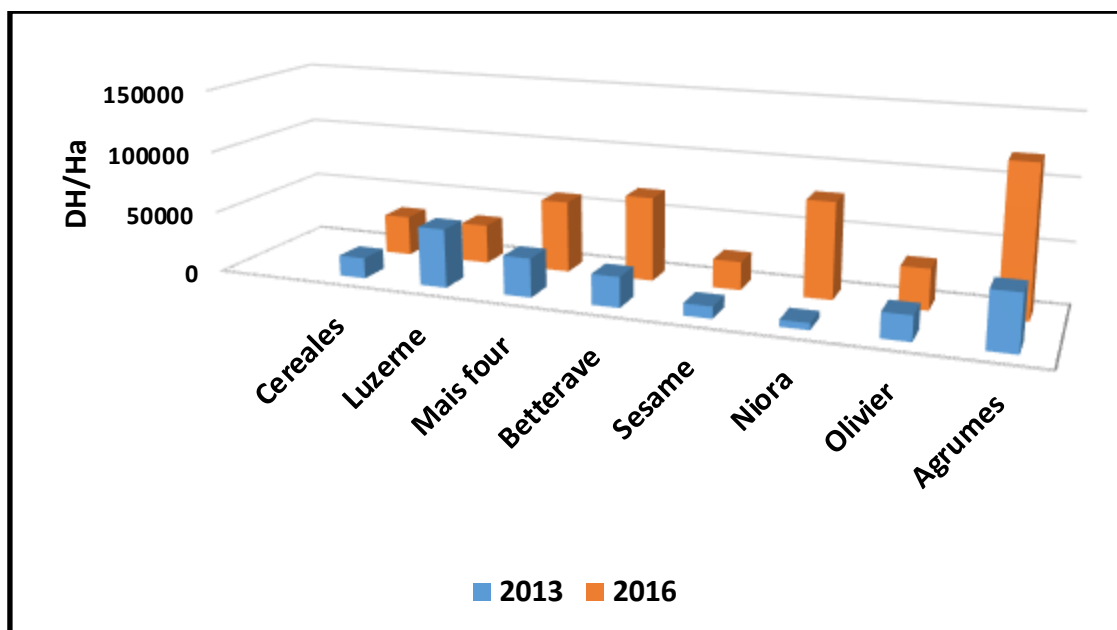
l'ensemble de l'année agricole tout en tenant compte de l'emplacement des phases sensibles des cultures au déficit hydrique.



**Figure 32 :** Variation des rendements des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet.

### **V-6-2 Le Produit Brut**

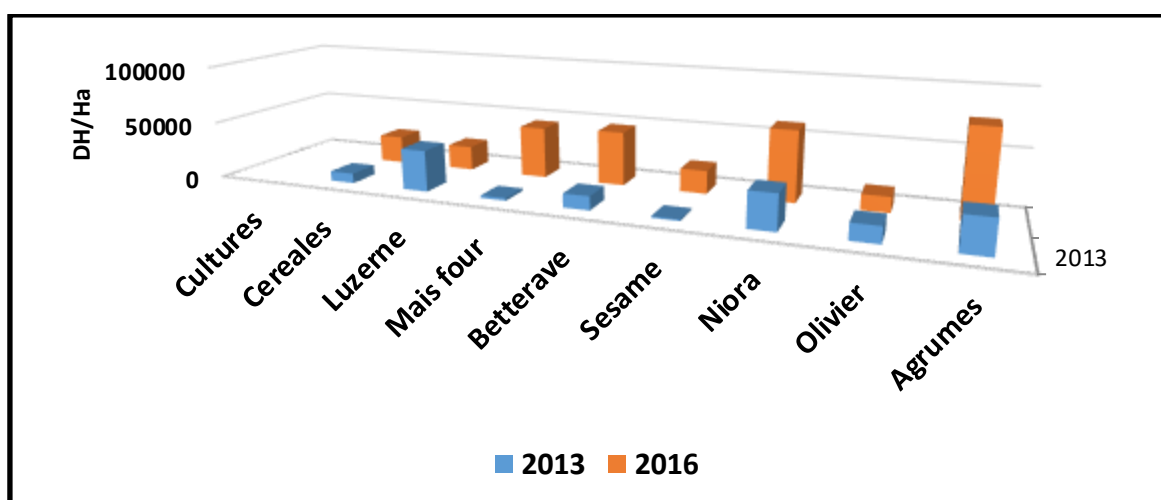
Cet indice est en parfaite adéquation avec l'évolution des niveaux de rendement obtenus sauf pour la culture de la luzerne (voir graphique ci-après) ayant accusé une diminution de 33% par rapport à la situation de référence. Partant du fait que le produit brut résulte du produit entre le rendement et la valeur marchande du produit récolté, la diminution constatée pour la luzerne ne peut provenir que de la baisse du prix d'écoulement du foin sur le marché en 2016 comparé à celui pratiqué en 2013 (régie par la loi de l'offre et de la demande). L'augmentation du rendement à elle seule (4 %) n'a pas pu compenser la chute des cours du foin de luzerne sur le marché en 2016.



**Figure 33** : Variation du produit brut des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet.

### V-6-3 La Marge Brute

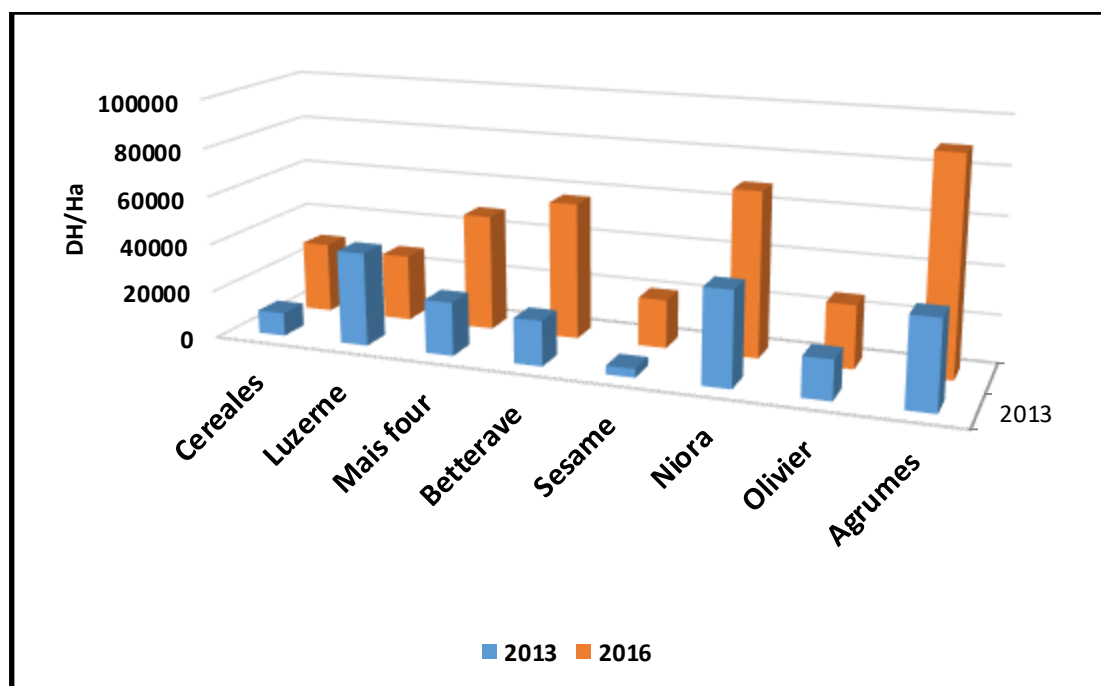
Pour la majorité des espèces végétales pratiquées par les agriculteurs enquêtés, la marge brute a suivi la même allure que le rendement et le produit brut comme visualisée sur le graphique ci- après, à l'exception de la luzerne et l'olivier ayant régressé de 41 et 4 %, quoique le rendement a augmenté de 4 et 32% respectivement. Cette tendance est à l'origine de la baisse de la valeur marchande du foin de luzerne et à l'augmentation des charges de production pour la culture de l'olivier entre les deux périodes comparées en l'occurrence 2013 et 2016.



**Figure 34** : Variation de la marge brute des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet

#### **V-6-4 La Valeur Ajoutée**

La reconversion collective des systèmes d'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée a induit d'une manière générale une amélioration de la valeur ajoutée pour la plupart des cultures cultivées de 60 à 465 % comme illustré sur la figure ci-dessous. Cependant, la culture de la luzerne a enregistré une baisse de cet indice de 29% suite au rabatement du produit brut (diminution du prix de foin) et l'augmentation des charges liées à la fourniture (fertilisants, semences et produits phytosanitaires) et le matériel utilisé lors de la conduite de la culture (tracteurs, faucheuse, traitement...).

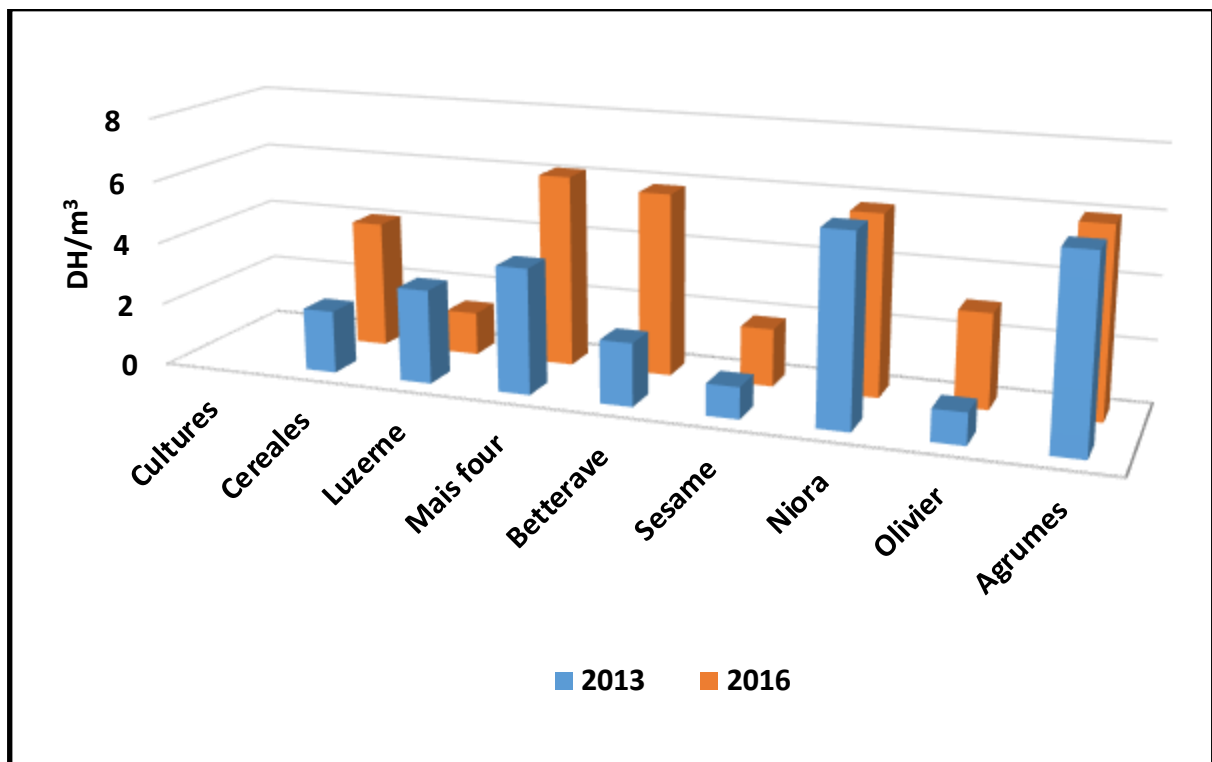


**Figure 35 :** Variation de la valeur ajoutée des cultures entre la situation De référence et celle d'après le projet

#### **V-6-5 La Valorisation de l'eau d'irrigation**

A l'instar des autres indices, cet indicateur agro-économique a connu lui aussi une augmentation moyenne toutes cultures confondues de 54 à 201 % comme porté sur le graphique ci-dessous, suite à la transition des agriculteurs à l'irrigation localisée. La culture de niora et la luzerne ont au contraire accusé une baisse de la valorisation de l'eau d'irrigation à hauteur de 4 et 54 % respectivement. Compte tenu de l'amélioration de la marge brute, le volume important consommé par la culture de niora est l'élément clé de la variation de la valorisation de l'eau utilisée entre les deux périodes. Concernant la luzerne, la baisse de la marge brute conjuguée à

une forte consommation de l'eau d'irrigation après la reconversion sont à l'origine de la faiblesse de la valorisation du mètre cube d'eau utilisée.



**Figure 36 :** Variation de la valorisation de l'eau par les cultures entre la Situation de référence et celle d'après le projet.

## **VI- Retombées économiques de la reconversion collective à l'irrigation Localisée à l'échelle de la zone pilote.**

La présente partie tente à travers les résultats agro-économiques de l'échantillon des exploitations ayant été retenues pour cette évaluation, de mettre en exergue les marges générées suite à la reconversion des systèmes d'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée au niveau des premiers secteurs de la zone pilote mises en eau depuis 2015. Les parcelles en question sont implantées au niveau de la première zone reconvertie dans le cadre du Projet de Modernisation de l'agriculture irriguée dans le Bassin de l'Oum Er Rbia (PROMER) sur une superficie de 4045 Ha. La première tranche de l'équipement interne s'étale sur une superficie de 10 235 ha

Le tableau ci-après, relate les résultats économiques obtenus suite à cette transition à l'irrigation localisée.

**Tableau 38** : Bilan généré par la reconversion collective  
A L'irrigation localisée

Projection	Sup (Ha)	Valeur ajoutée (DH/sup Totale)		Gain en VA		
		Situation référence	Poste projet	DH	DH/ha	%
Echantillon	199	5846452	7795269	<b>1948817</b>		
Secteur pilote	4045	118976196	158634928	<b>39658732</b>	9804	33
1ere Tranche	10235	301043601	401391468	<b>100347867</b>		

L'analyse des données portées au tableau synthétique ci-dessus permet de dégager les résultats suivants :

- A l'échelle de l'échantillon des propriétés agricoles évaluées (199 ha), le passage de l'irrigation gravitaire à l'irrigation localisée a généré une marge additionnelle s'élevant à presque **2 Millions de DH** (2 MDH), soit **33 %** de plus par rapport à la situation de référence. Ce montant global rapporté à la superficie totale des exploitations étudiées devient **9 804 DH** comme valeur ajoutée à l'hectare assolée.

Le manque générée suite à cette transition est imputé essentiellement à :

\* A l'intensification culturale : passage du Taux d'intensification culturale de 107 à 125 suite aux emblavements des cultures en dérobées pendant la deuxième moitié du cycle de la campagne agricole.

\* L'irrigation localisée est une technique très efficace sur le plan utilisation de l'eau d'irrigation et d'utilisation des fertilisants notamment l'azote volatil et facilement lessivable. Elle présente plusieurs vertus se répercutant positivement sur les rendements des cultures tant quantitatifs que qualitatifs. Au-delà de l'augmentation des rendements. Cette pratique est moins exigeante en main d'œuvre considérée comme poste le plus pesant sur le coût de revient des cultures. D'autres avantages s'inscrivent dans l'actif de cette technique d'irrigation, il s'agit notamment de la diminution des frais liée aux produits phytosanitaires contre les maladies cryptogamiques favorisées par des conditions d'humidité défavorables. En effet, ce mode d'irrigation permet d'arroser juste la zone racinaire et de manière non copieuse, avec de faibles doses mais rapprochée dans le temps, ce qui ne permet pas de créer des conditions d'humidité

au voisinage de la plante favorable au développement des agents pathogènes notamment fongiques.

- A l'échelle du secteur pilote (4 045 ha), la marge additionnelle dégagée par cette modernisation des anciens systèmes d'irrigation par rapport à la situation de référence s'élève à environ **40 MDH**

- A l'échelle de la 1ère tranche de reconversion collective (10 235 ha), ce passage vers des techniques d'irrigation économes et efficaces en eau d'irrigation a des retombées très saillantes se soldant par une valeur ajoutée de plus par rapport à la situation de référence d'avant-projet avoisinant les **100 MDH**.

En guise de conclusion pour cette partie d'évaluation agro-économique, nos résultats sont en parfaite concordance avec les résultats des autres auteurs (Ammari O. et Bayali N. (2016). Sidikou H. (2016)) ayant travaillé dans la même zone et ont rapporté une nette supériorité de l'irrigation localisée par rapport à l'ancienne technique d'irrigation gravitaire d'avant-projet pour tous les indicateurs étudiés. Aussi, nos résultats confirment, dans l'ensemble, ceux déjà obtenus dans plusieurs études antérieures et dépassent de peu ceux obtenus par Bouaziz et Belabbes, en 2002 (l'EUE variait de 3,9 kg/m<sup>3</sup> à 16,7 kg/m<sup>3</sup> à l'échelle du Maroc et la valorisation de l'eau d'irrigation n'excédait 3 Dh/m<sup>3</sup> que pour l'arboriculture et les primeurs) et Moughli et Benjelloun, en 2000 ayant conclu que seuls les primeurs permettaient des niveaux de valorisation dépassant 3 Dh/m<sup>3</sup>. Ceci peut être dû à la variabilité des prix de ces produits d'une année à une autre.

Concernant les retombées économiques de cette transition à l'irrigation localisée, les résultats sont très palpables et se chiffrent à des valeurs additionnelles de 100 MDH par rapport à la situation de référence d'avant-projet.

## *Chapitre III*

# *EXPERIMENTATION*

## **CHAPITRE 3 : Expérimentation sur le pilotage de L'irrigation Localisée**

Ce volet expérimental touche un aspect fondamental, celui du pilotage des irrigations des cultures, faisant souvent défaut chez la plupart des agriculteurs de la région. C'est dans cet esprit que nous présenterons dans ce qui suit, les résultats de l'étude sur la validité de l'approche climatique basé sur le référentiel journalier de Penman Monteith dans la conduite de la betterave à sucre au périmètre irrigué du Tadla et précisément au niveau des premiers secteurs de la zone nouvellement reconvertie au système d'irrigation localisée.

### **I- Justification de l'étude**

Les résultats de l'étude des performances de l'irrigation localisée effectuée à l'échelle de la zone pilote de la reconversion collective au Tadla ont montré qu'en dépit de l'économie d'eau réalisée en terme d'utilisation des eaux souterraines suite à l'introduction de l'irrigation localisée, on assiste à une intensification culturale traduite par une augmentation de l'utilisation des eaux de surface (Mouradi A. et al., (2018)) pouvant constituer un gisement important d'économie d'eau. Par ailleurs, l'optimisation et la préservation de la ressource en eau est au centre des préoccupations agricoles. C'est un enjeu majeur pour sécuriser les productions. La gestion quantitative et qualitative de l'eau est un défi partagé ([file:///C:/Users/Admin/Downloads/Irrigation\\_cours\\_2016.pdf](file:///C:/Users/Admin/Downloads/Irrigation_cours_2016.pdf) ). De sa part, Belghiti, (2009) a avancé que dans un contexte hydrique aussi tendu, le concept d'économie d'eau revêt un caractère particulier. Selon Tron G. et al., (2000), il commence à être admis que l'utilisation de l'eau pour la production agricole doit s'envisager avec parcimonie, tout autant pour éviter le gaspillage d'un bien qui se raréfie, que pour promouvoir une agriculture plus respectueuse de l'environnement. Par ailleurs, il est à présent démontré que pour de nombreuses productions, indépendamment du prix de l'eau, les apports trop abondants n'assurent pas les meilleures performances économiques. Cependant, entre les bonnes intentions de la façon, de mieux irriguer et la réalité, des progrès immenses restent à faire. Rebecca S. et Anne Pam F., (2011) ont souligné que la surveillance de l'humidité du sol est la clé pour apporter la bonne quantité d'eau aux cultures, au bon moment et appliquer l'eau et les éléments nutritifs de manière efficace. Ceci ne peut que procurer des rendements accrus, des produits de bonne qualité, une vigueur accrue aux plants, une réduction de maladies, une plus grande valorisation de l'eau (efficacité de l'eau) et une réduction des coûts d'irrigation. Vallée, J. et al (2014), ont rapporté que peu de producteurs utilisent des instruments de mesure pour déterminer à quel moment



déclencher les irrigations. Ces derniers basent généralement leur décision sur l'aspect visuel de la culture et sur le toucher du sol, ce qui conduit souvent à une gestion inefficace de la ressource en plus de représenter des risques de pollution diffuse.

C'est dans cet esprit d'efficacité et de conduite opportune et économe de l'irrigation, réduite aux stricts besoins en eau des cultures que la présente étude tente d'étudier la validité de l'approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith dans la conduite rationnelle des arrosages de la betterave à sucre (Beta vulgaris, L) sous système d'irrigation localisée en vue de sa généralisation à l'échelle du périmètre de la reconversion collective.

## **II- Approche du travail**

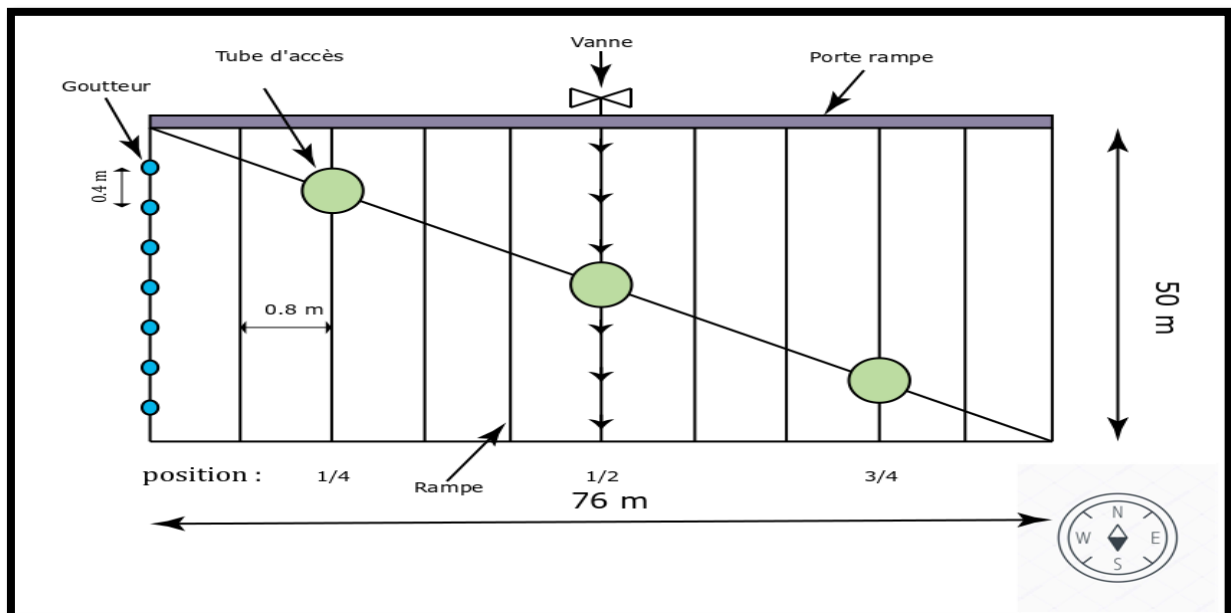
Pour parvenir aux objectifs assignés au présent travail, un cheminement méthodologique a été adopté. Il consiste à mener une expérimentation au champ chez un agriculteur de la zone pilote de la reconversion collective à l'irrigation localisée sur une culture de la betterave à sucre (Beta vulgaris L.). Les résultats de l'expérimentation seront confrontés à ceux issus de la parcelle témoin irriguée selon les acquis propres à l'agriculteur. Les parcelles ont été conduites de manière similaire en recevant les mêmes facteurs de production à l'exception du mode d'irrigation. Le choix de la betterave à sucre pour cette étude est justifié d'une part par son importance dans l'assolement pratiqué au périmètre irrigué du Tadla et d'autre part par sa forte consommation en eau d'irrigation et son efficacité pour exploiter une ressource naturelle comme le rayonnement solaire et l'eau devenant de plus en plus coûteuse (Maraliene H. et al, (2008)).

La conduite des irrigations s'est basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith pour l'estimation de l'Evapotranspiration de références ( $ET^{\circ}$ ) à partir de quelques variables climatiques et la détermination par la suite des besoins en eau de la culture (ETM). Selon certains auteurs (Ammari O. et Bayali N., (2016)), l'ETM reste un indicateur théorique et il convient d'estimer ce que sera sa consommation réelle en eau (l'évapotranspiration réelle : ETR) déterminée par la méthode du bilan hydrique :

$$ETR = \text{Apports} - \text{Pertes} \pm \Delta S,$$

$\Delta S = \text{Stock}_j - \text{Stock}_{j-1}$  Estimée à partir des valeurs d'humidités volumiques journalières mesurées par les sondes capacitatives installées à cet effet. Trois sondes réflectométriques de technologie FDR préalablement étalonnées in-situ ( $r^2$  moyen = 0.9 avec un Ecart type de 0.1 et un coefficient de variation de 9.26 %) par la méthode gravimétrique ont été placées en un point représentatif du champ et à un endroit où les racines sont denses et en position diagonale comme stipulé sur le schéma du dispositif expérimentale ci-dessous. Ces

sondes programmables mesurent et enregistrent à des pas de temps simultanément l'humidité et la température du sol tous les 10cm et sur une profondeur de 60 cm. Selon Rebecca S. et Anne Pam F., (2011), on compte en général un point de collecte par champ, mais un plus grand nombre peut être nécessaire si le champ est vaste et si les conditions où les pratiques de gestion sont variables. Plus les données colligées ne sont nombreuses, meilleures seront les décisions d'irrigation. Les mêmes auteurs recommandent dans le cas de l'irrigation goutte à goutte, l'emplacement de ces instruments de mesure à mi-chemin entre le goutteur et la limite extérieure du front d'humectation où les racines sont denses. Ce matériel a été préalablement calibré in-situ par la méthode gravimétrique afin d'avoir un contrôle fiable du statut hydrique du sol. La collecte de données et les informations ont été effectuée sur la base des entretiens entrepris avec l'exploitant sur différents aspects ayant traits à l'exploitation, à l'utilisation des ressources et à la productivité. Des visites de terrain ont eu lieu de manière régulière pour mesurer in situ certains paramètres techniques. Sur le plan instrumentation, le matériel utilisé est constitué de manomètres, éprouvettes graduées, chronomètres, flacons, tarière, balance de précision et une étuve. Le dépouillement et le traitement des données, la réalisation de graphiques a été effectuée sur un tableur Excel de Microsoft Office (version 2016) avec usage de toutes ses fonctionnalités de traitement statistique (calcul de moyenne, écart type standard). Les schémas ont été réalisés à l'aide du logiciel Auto C.a.d version 2009.



 : Sondes capacitives

**Figure 37** : Schémas du dispositif expérimental

### **III - RESULTATS ET DISCUSSIONS**

#### **III-1 Contrôle du statut hydrique du sol**

La maîtrise de l'irrigation au niveau de la parcelle peut s'appuyer sur le contrôle de l'état hydrique du sol. Ce mode de conduite développé depuis plusieurs années reste indispensable pour fournir des références sur l'utilisation de l'eau du sol (Balas B. et al (1995)). Le contrôle a porté sur le suivi de plusieurs indicateurs de l'état hydrique du sol.

##### **III-1-1 Variation de la teneur en eau du sol**

Les résultats inhérents à l'état hydrique du sol durant le cycle de croissance et de développement de la betterave à sucre montrent un confort dans l'alimentation hydrique de la culture. Le mode de pilotage de l'irrigation adopté a créé donc des conditions optimales d'humidité du sol au voisinage des racines de la betterave à sucre.

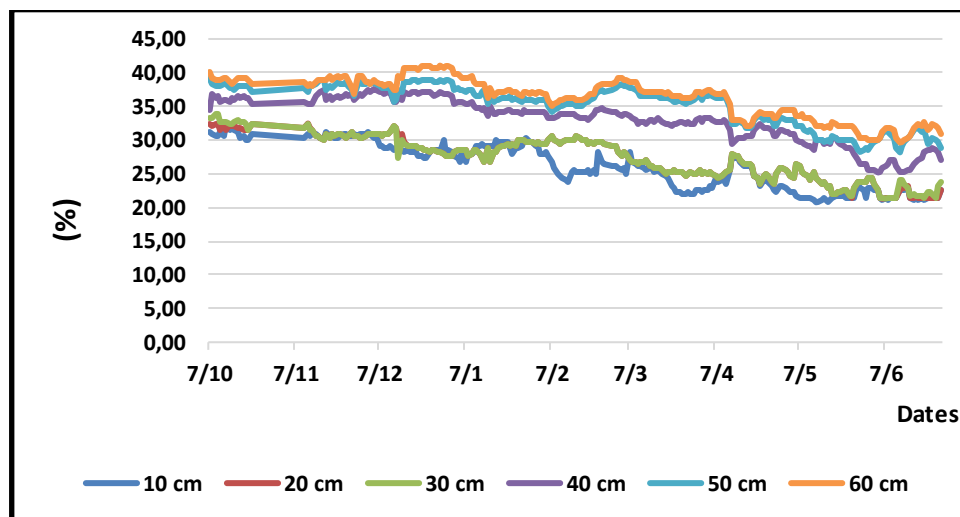
D'après le graphique ci-dessus, la teneur en eau diminue avec le temps suite à une augmentation des besoins en eau de la culture et aux pertes d'eau par évaporation. L'humidité connaît de légères fluctuations au cours du cycle de la culture du fait de la structure argilo-limoneuse du sol caractérisé par une grande capacité de rétention d'eau. Elle reste dans la fourchette des humidités caractéristiques des sols de la zone d'étude (entre Hcc : 249 mm et Hpf : 138 mm comme relaté sur le tableau ci-dessus).

**Tableau** 39 : Teneur en eau des horizons du sol correspondant  
Aux humidités caractéristiques du sol.

<b>Z</b>	<b>Hcc</b>	<b>Hpf</b>
<b>Cm</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
<b>0 à 10</b>	36,4	19,76
<b>10 à 20</b>	38,85	21,09
<b>20 à 30</b>	36,72	20,4
<b>30 à 40</b>	36,38	20,33
<b>40 à 60</b>	100,8	56
	<b>249</b>	<b>138</b>

Cette situation a conféré à la plante un confort hydrique durant tout son cycle de croissance. Ce résultat corrobore avec celui rapporté par Colaizzi et al, 2003 :

<https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole> ayant montré que l'irrigation localisée maintient un niveau élevé de l'humidité du sol, nécessaire pour satisfaire les besoins en transpiration de la plante. L'évolution du taux d'humidité par horizon du sol montre une augmentation de celle-ci avec la profondeur, ce qui confirme les résultats obtenus par ELAME M.T., (2017) ayant travaillé sur la productivité du maïs ensilage sous irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla en prospectant un horizon du sol de 0 à 1m et Sakellariou-Markantonaki M. et al., (2002), ayant étudié la distribution de l'humidité d'un sol emblavé par la culture de la betterave à sucre irriguée par système goutte à goutte de surface sur l'horizon 0-75 cm. Les couches de la surface du sol sont sujettes à l'évaporation, ce qui diminue leurs teneurs en eau comparativement aux couches profondes. Sakellariou-Markantonaki M. et al., (2002) ont trouvé pour l'horizon de surface que l'humidité est faible et est proche du point de flétrissement (Pf : 11.48%) pour le régime d'irrigation 100 % des besoins en eau, et légèrement supérieure au Pf pour le régime 80%. Dans l'horizon du sol 30-60 cm, l'humidité est inférieure à la valeur de la capacité au champ. Ammari o. et Bayali N., (2016) ont trouvé dans certains cas au Tadla que la teneur en eau augmente en profondeur comparée aux horizons superficiels, ceci se traduit par la forte densité racinaire favorisant l'écoulement vertical de l'eau, combiné à une forte évaporation au niveau de la surface.



**Figure 38** : Variation de l'humidité du sol en profondeur au cours Du cycle de la betterave à sucre.

### III-1-2 Calcul du stock d'eau dans le sol

Le stock en eau du sol est calculé selon l'équation (1) en intégrant les profils hydriques relatifs aux domaines D (10cmx20cmx30cmx40cmx50cmx60cm)

composés de volumes élémentaires du sol pour une profondeur de 60 cm. Les volumes du sol ont été considérés homogènes pour faciliter les calculs. Selon Boutheina D. et al 2012, le stock en eau du sol (S) est donné comme suit :

$$(1) \quad S = \text{Somme } D\theta(x, y, z)dx, dy, dz$$

Les stocks d'eau sont calculés en intégrant la fonction  $\theta(x, y, z)$ , grâce aux différentes mesures des teneurs en eau du sol à différentes profondeurs et en différents points.

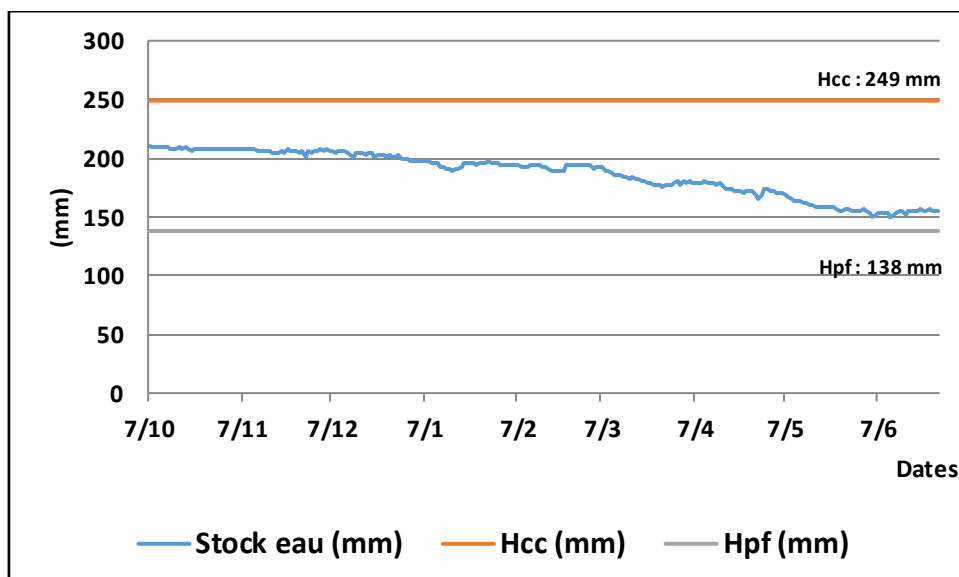
$\theta(x, y, z)$  : Teneur en eau volumique du sol en (%) au point nodal de coordonnées (x,y,z).

dx, dy, dz : Dimension de l'espace couvrant l'ensemble du Domaine  
D'intégration D [L] en mm.

L'analyse de la figure ci-après montre qu'au début du cycle, le stock d'eau était voisin de la capacité au champ (Hcc) suite aux précipitations ayant prévalu durant cette période et aux apports d'irrigation opérés au semis pour assurer la germination et la levée de la semence de la betterave à sucre dont les assises sclerenchymateuses sont très résistantes à la pénétration de l'eau et exigent donc une humidification plus prolongée (Papy F., (1973)).

Le stock d'eau diminue au fur et à mesure qu'on avance dans le cycle suite à l'augmentation de la demande climatique sans pour autant atteindre l'humidité au point de flétrissement (Hpf). La diminution du stock d'eau est prononcée au fur et à mesure que le climat devient plus chaud et que la plante atteint un stade végétatif plus avancé, ce qui corrobore avec ce qui a été trouvé par Boutheina D. et Boujelben A., (2010).

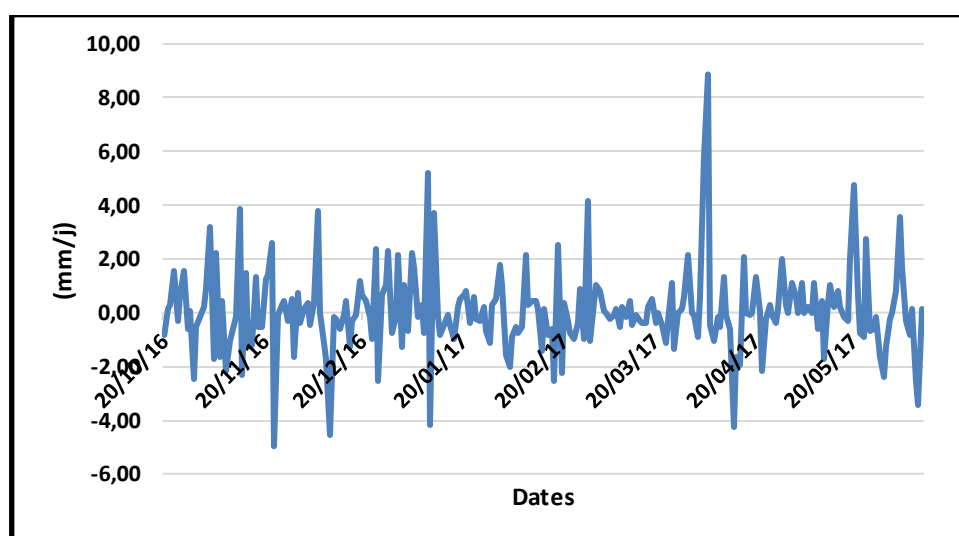
Le maintien de l'humidité du sol durant tout le cycle à des niveaux avoisinant Hcc dans la majeure partie du cycle et en dessus de la limite inférieure des humidités caractéristiques du sol (Hpf) témoigne des conditions hydriques plus confortables pour une alimentation stable de la plante. Ces résultats confirment ceux obtenus par Colaizzi et al, (2003) : <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d-irrigation-agricole> montrant que les systèmes de micro-irrigation arrosent selon une fréquence élevée créant ainsi dans le sol des conditions d'humidité optimales pour la plante.



**Figure 39** : Evolution du stock d'eau du sol sur l'horizon 0-60 cm

### III-1-3 Variation du stock d'eau journalier du sol

Comme mentionné sur le graphique ci-après, la variation du stock d'eau journalier ( $\Delta S = S_{jn} - S_{jn-1}$ ) du sol pour l'irrigation localisée conduite selon le référentiel journalier de Penman Monteith fluctue entre un minimum de  $-4.98 \text{ mm/j}$  et un maximum de  $8.87 \text{ mm/j}$  avec une moyenne journalière de  $0.06 \text{ mm}$ . Globalement, la fluctuation est faible à l'exception de quelques points où la variation est négative causée par l'importance des prélèvements par la plante et la forte évaporation du sol. Cette faible variation confère à la culture une alimentation hydrique stable et confortable.



**Figure 40** : Variation du stock d'eau du sol mesuré au cours du cycle Cultural de la betterave à sucre

### **III-1-4 Comparaison entre ETM et ETR**

La comparaison entre l'Evapotranspiration Réelle (ETR) et l'Evapotranspiration Maximale (ETM), permet d'apprécier la pratique d'irrigation et son influence sur l'état hydrique du sol et de la plante.

#### **III- 1-4-1 Base de calcul**

La comparaison entre l'Evapotranspiration Réelle (ETR) et l'Evapotranspiration Maximale (ETM), permet d'apprécier la pratique d'irrigation et son influence sur l'état hydrique du sol et de la plante. L'ETM a été déterminée à travers L'Evapotranspiration journalière ( $ET^\circ$  : mm/j) estimée par la formule de Penman Monteith :

$$ETM \text{ (mm/j)} = ET^\circ \times Kc \times Kr ;$$

Avec

- Kc : coefficient culturale dépendant du type de culture et de son stade phénologique (phase initiale, développement, mi saison et arrière-saison)
- Kr : Coefficient de réduction variant avec le taux de couverture du sol (Cs) par le végétal au cours du cycle majoré de 15%,  $Kr = Cs \times 1.15$  (Phocaidés A., (2008)).

L'ETR a été calculée par la méthode du bilan hydrique prenant en compte plusieurs grandeurs :

- La pluviométrie (P),
- La teneur volumique en eau du sol ( $\Delta\theta = \theta_n - \theta_{n-1}$ ),
- L'Evapotranspiration (ETR)
- Les apports d'eau par l'irrigation (I).

L'équation du bilan hydrique est définie comme suit :

$$\theta_n = \theta_{n-1} + P + I - ET \text{ (Déroche O., (2017)).}$$

D'autres auteurs ont introduit à l'équation du bilan hydrique, les paramètres liés aux pertes par drainage (-D) et le ruissellement (-R) et les apports par remontée capillaire (+RC) et le bilan hydrique est ramené à :

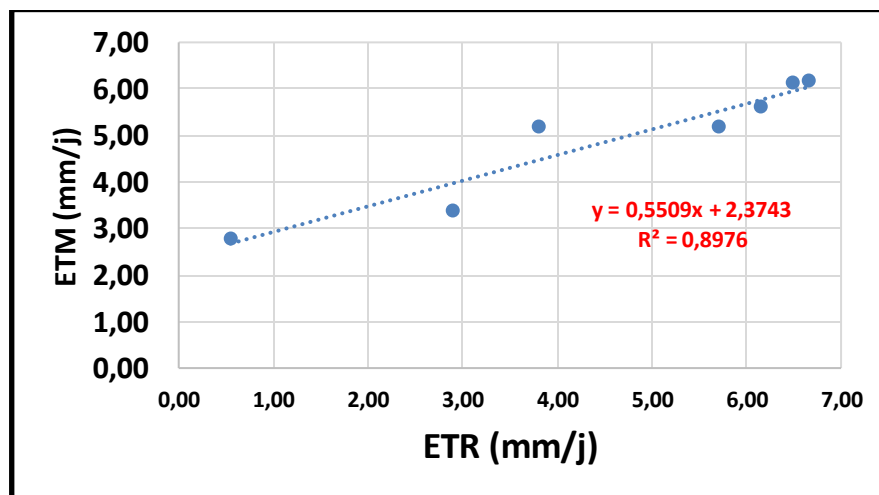
$$ETR = (P + I + RC) - (D + R) \pm \Delta S.$$

Le drainage et le ruissellement sont affectés par la topographie du terrain. En effet, les terrains à forte pente favorisent le ruissellement sur le drainage et la tendance est inverse pour les sols plats. Ce problème ne se pose pas au niveau de la zone étudiée étant donné que les

terrains sont plats à très faible pente conjugué à la nature argileuse des sols exploités par les agriculteurs. Ce constat a été déjà abordé par Ammari O. et Bayali N., (2016), ayant travaillé dans la même zone d'étude, et ayant rapporté que les pertes par percolation sont négligées du fait que les sols de la zone sont faiblement à moyennement perméables ( $K_{s \text{ moy}}$  : 0.32 cm/h variant de 0.37 à 0.28 cm/h en passant de l'horizon de surface 0-30 cm à celui de profondeur 30-50 cm (Labomag, (2012)) et ont une forte capacité de rétention (forte teneur en argile de 44 à 46%), les sols deviennent ainsi collants et très imperméables, constituant donc une barrière aux remontées capillaires et à l'infiltration. Egalement les pertes dues aux fuites au niveau des vannes des installations sont absentes.

### **III-1-4-2 Corrélation entre ETM et ETR**

La courbe de corrélation entre ces deux paramètres permet d'apprécier l'efficacité du mode de pilotage adopté dans cette expérimentation. Il ressort à travers l'équation de corrélation comme mentionné sur le graphique ci-après, que les besoins en eau estimés par la formule de Penman Monteith (ETM) sont très corrélés ( $r^2 \approx 0.9$ ) à ceux mesurés par la méthode du bilan hydrique du sol (ETR). Ces résultats prouvent bien l'efficacité de la méthode testée dans le pilotage des arrosages de la betterave à sucre dans le contexte du Tadla.



**Figure 44** : Corrélation entre l'Evapotranspiration Réelle et celle Maximale

### **III-1-4-3 Evolution cumulée de l'ETR et de l'ETM.**

L'allure du graphique ci-dessous montre que l'ETR en début de cycle dépasse de manière considérable l'ETM, chose qui est imputée aux :

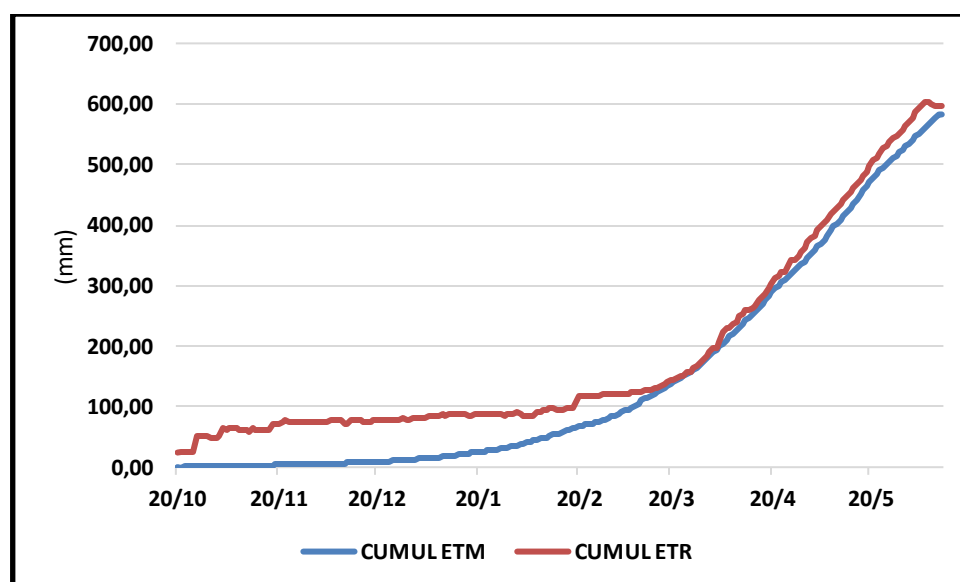


- Apports copieux d'eau d'irrigation (2x25 mm) opérés au moment de l'installation de la culture, dépassant de loin les prélèvements de la plante et la demande climatique et ce pour assurer une bonne imbibition de la semence de la betterave à sucre (à téguments sclerenchymateux et enrobage) exigeant une forte humidité du sol pour déclencher le processus de germination et assurer ainsi une bonne émergence des plantules,
- Aux pluies automnales et hivernales que la région a connu en cette période du cycle de la culture, s'élevant à 73 mm

Ces différents apports compensent et de manière excédentaire les besoins de la plante et par conséquent améliorent la variation du stock d'eau du sol ( $\Delta s > 0$ ) augmentant ainsi, l'ETR au niveau de l'équation du bilan hydrique ( $ETR = (P + I + RC) - (D + R) \pm \Delta S$ ).

A Partir de la fin du mois de mars, le cumul de l'ETR commence à baisser pour s'approcher de celui de l'ETM et la plante se trouve ainsi dans des conditions d'alimentation hydriques confortables. En certaines périodes l'ETR passe au-dessous des besoins en eau et la plante se trouve alors dans les conditions de stress hydrique et régule ses stomates (diminution de la transpiration).

Sur l'ensemble du cycle, L'ETR moyenne reste en dessous de l'ETM avec respectivement une moyenne journalière de 4.61 et 4.91 mm et un cumul de 478 et 504 mm pour la dernière partie du cycle à partir du mois de Mars.



**Figure 42** : Evolution cumulée de l'Evapotranspiration Réelle et celle Maximale Durant la campagne agricole 2016-2017

### **III-1-5 Calcul de l'indice de stress hydrique.**

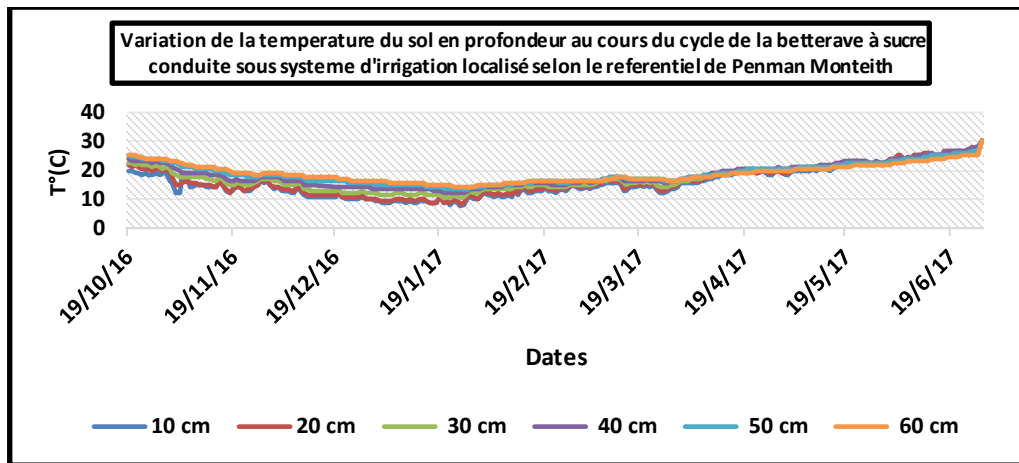
L'indice CWSI (Crop water Stress Index) sert au pilotage de l'irrigation en zones arides, et permet de quantifier le stress hydrique. Jackson et al. 1981 à partir de l'équation du bilan d'énergie, a montré que :

$$\text{CWSI} = 1 - \text{ETR/ETM}.$$

Dans notre étude où l'irrigation a été conduite à 100% d'ETM selon le référentiel journalier de Penman Monteith, cet indice vaut en moyenne 0.2, ce qui montre que l'ETR moyenne est maintenue proche de l'ETM conférant à la culture un confort hydrique durant tout son cycle cultural. (Oulli L., (1993) au Doukkala avec un régime conduit à 100% d'ETM a maintenu cet indice au voisinage de 0.5). Comme la méthode du bilan hydrique est sensible aux variations journalières, l'interprétation des données a été établie sur la base de moyenne journalier des périodes allant de 10 à 15 jours. Le bilan n'a été effectué qu'à partir du mois de mars car il fallait attendre le ressuyage du sol des pluies reçues en début du cycle. L'ETR moyenne du cycle de la culture (4.61 mm/j) mesurée par la méthode du bilan hydrique reste en dessous de la moyenne des besoins en eau estimés empiriquement par l'approche climatique basé sur le référentiel journalier de Penman Monteith (4.91 mm/j), ce qui se traduit par la réduction de l'évapotranspiration des plantes suite à la régulation des échanges avec le milieu environnant quand elles sont en situation de stress hydrique et de fort pouvoir évaporant de l'air.

### **III-2 Contrôle du régime thermique du sol**

Dans cette partie nous allons relater les conditions thermiques du sol ayant prévalu durant le cycle de la culture et d'analyser leurs effets probables sur les conditions de croissance et de développement de la betterave à sucre.



**Figure 43** : Variation de la température du sol en profondeur

La température du sol, toutes profondeurs confondues, évolue au cours du cycle de croissance de la culture en fonction de la succession des saisons pour atteindre des températures moyennes élevées en fin de saison. Comme stipulé sur le graphique ci-dessus, les températures moyennes du sol oscillent entre un minimum de 7.7 °C enregistré en début de saison au niveau de l'horizon superficiel de 10 cm à 30.2 °C enregistré en fin du cycle de la culture pour l'horizon 50 cm. Globalement la température du sol pour la première partie du cycle, augmente en passant de la surface du sol aux horizons profonds, ce qui est en accord avec les résultats de Willis W.O. et Power J.F., (1975) ayant étudié la variation de la température en fonction du temps pour différentes profondeurs du sol (4, 6 et 8 pieds). Toutefois, à partir du début du mois d'avril, les profils des températures tendent à s'inverser, chose qui peut être imputée essentiellement aux variations des conditions climatiques entre le début et la fin du cycle de la culture. Selon Florides G. et Kalogirou S., (2004), la distribution de la température du sol est affectée par plusieurs facteurs dont entre autres les variations journalières des conditions climatiques ambiantes pouvant affecter la température du sol jusqu'à une profondeur approximative de 1 mètre. Al-kaisi M.M. et Lowery B., (2017) ont rapporté que la température du sol se modifie en allant en profondeur du fait qu'une certaine quantité de chaleur est absorbée ou libérée le long du trajet une fois la température des matériaux du sol conducteur change.

En se référant aux exigences thermiques de la culture et à travers l'analyse de la variation de la température par horizon du sol, il se dégage que la plante a accompli son cycle de croissance et de développement dans des conditions convenables. Ce régime d'irrigation a sans doute créé un environnement favorable à la culture tant sur le plan alimentaire hydrique que nutritionnel. En effet, selon Lemaire P., 1981 cité par <file:///C:/Users/user/Downloads/53305b8054214.pdf>, l'optimum de croissance, pour toutes les

phases de la betterave à sucre, se situe autour de 20-25°C, avec une moyenne nocturne de 15°C. Par ailleurs, il a été rapporté dans une étude que la croissance de la betterave est souvent altérée par la compaction et les températures froides. La croissance des racines est faible à 10°C qu'à 20°C. Sur le plan nutrition minérale, La température du sol affecte l'afflux du phosphore (Hoffmann M. et Jungk A., (1996)).

## **IV- PERFORMANCES AGRO-ECONOMIQUES DE LA CULTURE**

### **IV-1 Paramètres quantitatifs et qualitatifs**

L'effet du traitement étudié sera reflété à travers l'analyse des indicateurs agro-économiques portés au tableau ci-après. Les paramètres retenus à cet effet portent sur le rendement quantitatif et qualitatif, l'efficience d'utilisation de l'eau d'irrigation et la valeur ajoutée procurée. En comparant les résultats obtenus, on note un dépassement par rapport au témoin de 77, 31 et 170% respectivement pour le rendement racines (ce qui corrobore avec les résultats de Colaizzi et al, 2003 cité par <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-dirrigation-agricole> ayant montré un accroissement des rendements des cultures dû au maintien d'un niveau élevé de l'humidité du sol, nécessaire pour satisfaire les besoins en transpiration de la plante), la richesse saccharine et le rendement sucre, ce qui peut être imputé essentiellement aux conditions de croissance favorables générées par le traitement étudié lié à la rationalisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation en apportant que les besoins stricts de la culture et au moment opportun. En effet, tout déficit ou excédant d'eau d'irrigation ne peut que nuire au développement normal de la betterave à sucre : Tron G. et al., (2000) ont souligné que l'utilisation de l'eau agricole doit s'envisager avec parcimonie. Il est à noter que la parcelle servant de témoin a été conduite par l'agriculteur selon son expérience cumulée en matière d'irrigation de la betterave à sucre.

**Tableau 40** : Etat comparatif des rendements quantitatifs et qualitatifs  
De la betterave à sucre. Source SUTA (2016)

<b>Campagnes</b>	<b>Rdt (t/ha)</b>	<b>Richesse (%)</b>	<b>Rdt sucre (t/ha)</b>
Essai	109,73	20,02	19,8
Témoin	62,02	15,33	7,32
<b>Variation</b>			
<b>(%)</b>	<b>77</b>	<b>31</b>	<b>170</b>

## **IV-2 ECONOMIE ET VALORISATION DE L'EAU D'IRRIGATION**

En matière de consommation et de valorisation de l'eau d'irrigation par la betterave à sucre comme stipulé dans le tableau ci-après, il y a lieu de signaler une économie d'eau d'irrigation de l'ordre de 28% procurée par le mode de pilotage adopté en comparaison à celui adopté par l'agriculteur (ce qui confirme les résultats de Colaizzi et al, 2003 cité par <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole> rapportant qu'avec une gestion appropriée, la micro-irrigation économise de l'eau car celle-ci est apportée en faible quantité uniquement dans la zone racinaire, ce qui évite les pertes par percolation, l'utilisation de l'eau par des adventices ou l'évaporation à partir de la surface du sol). En effet, l'usager agricole, imprégné du mode d'irrigation gravitaire se base souvent sur l'aspect visuel de la culture et le touché du sol, ce qui conduit souvent selon Vallée, J. et al., (2014) à une gestion inefficace de la ressource en plus de représenter des risques de pollution diffuse.

**Tableau 41** : Etat comparatif de l'allocation de l'eau et sa valorisation  
Par la betterave à sucre.

	<b>Consommation</b>	<b>Valorisation eau</b>	<b>EUE</b>	
	<b>(m<sup>3</sup> eau/ha)</b>	<b>(DH/m<sup>3</sup> eau)</b>	<b>(kg racines/m<sup>3</sup> eau)</b>	<b>(kg sucre/m<sup>3</sup> eau)</b>
<b>Essai</b>	5830	7,14	16,26	2,50
<b>Témoin</b>	8083	3,75	7,67	0,91
<b>Variation (%)</b>	<b>-28</b>	<b>91</b>	<b>112</b>	<b>176</b>

**EUE** : Efficience d'utilisation de l'eau

En termes d'efficience, on note un net dépassement par rapport au témoin de 112, 176 et 91 respectivement pour le rendement quantitatif, qualitatif et la valorisation de l'eau d'irrigation. En effet, le mode d'irrigation basée sur l'approche climatique a permis une économie d'eau substantielle (28%) et des rendements quantitatifs et qualitatifs meilleurs que celui adopté par l'agriculteur.

## **IV-3 Rentabilité de la culture**

Les résultats afférents à la rentabilité de la betterave à sucre dressés dans le tableau ci-dessous relatent une nette supériorité du traitement étudié comparativement au témoin de l'ordre de 55, 38 et 70% respectivement pour le produit brut, le revenu et la valeur ajoutée à l'hectare. La variation des charges relative aux CHfm de 7% est liée uniquement au coût de

l'eau consommée en excès au niveau de la parcelle témoin suite au mode d'irrigation adopté par l'agriculteur.

**Tableau 42** : Etat comparatif des résultats des indices agro-économiques De la Betterave à sucre. (\*) : Source SUTA (2016)

	<b>CHfm</b>	<b>PB(*)</b>	<b>RV(*)</b>	<b>VA</b>
	<b>(DH/ha)</b>	<b>(DH/Ha)</b>	<b>(DH/Ha)</b>	<b>(DH/Ha)</b>
Essai	9379	66647	41654	57268
Témoin	10100	43037	30277	33537
Variation (%)	<b>-7</b>	<b>55</b>	<b>38</b>	<b>70</b>

**CHfm** : Charges liées à la fourniture et le matériel, **PB** : Produit brut

**VA** : Valeur ajoutée (PB-CHfm), **RV** : Revenu (PB- charges totales)

## **V- CONCLUSION DE LA PARTIE EXPERIMENTATION**

En guise de conclusion et à la lumière des résultats obtenus, l'approche climatique basé sur le référentiel journalier de Penman Monteith est tout à fait valable dans le contexte du Tadla pour prédire les besoins en eau et planifier les arrosages de la betterave à sucre. Le mode de pilotage d'irrigation testé a créé à la culture les conditions hydriques favorables lui permettant d'exprimer pleinement son potentiel de production tant sur le plan qualitatif que quantitatif et peut à cet effet être un outil efficace pour une régie optimale des irrigations évitant tous les risques de gaspillage et de pollution diffus. En matière d'instrumentation, les sondes capacitatives de technologie FDR semblent être des outils efficaces pour surveiller l'humidité et fournir des références sur l'utilisation de l'eau du sol. Il convient donc d'assortir l'appui au développement de l'irrigation localisée d'un accompagnement rapproché des usagers agricoles pour une conduite opportune et économe, réduite aux stricts besoins en eau de la culture assurant une utilisation sobre des facteurs de production et se parer des problèmes environnementaux.

**CHAPITRE 4**

**CONCLUSION GENERALE ET**

**RECOMMANDATIONS PRATIQUES**

## **CHAPITRE 4 : Conclusion générale et recommandations**

### **Pratiques**

#### **I - Conclusion générale**

A l'issue de l'étude sur les performances techniques du système d'irrigation localisée et son impact environnemental et agro-économiques dans les premiers secteurs de la reconversion collective des systèmes d'irrigation gravitaires à l'irrigation localisée au périmètre irrigué du Tadla, appuyée par des enquêtes et des évaluations de certains indicateurs de performance du système et au terme de l'étude expérimentale sur le pilotage des irrigations, certaines conclusions et recommandations pratiques peuvent être dégagées :

En amont du système, les problèmes liés à la qualité de l'eau d'irrigation sont à écarter pour le moment étant donné que les eaux provenant du barrage Bin El Ouidane sont de bonne qualité et ne présentent aucune restriction quant à leur utilisation dans l'irrigation des cultures. Les risques de colmatage du matériel d'irrigation localisée et d'imperméabilisation des sols sont aussi à écarter pour le moment.

En matière performances techniques du système d'irrigation localisée, les résultats les plus saillants concernent les aspects suivants :

En matière d'allocation de l'eau d'irrigation, les irrigants apportent plus de ce qu'il faut aux cultures (taux de satisfaction des besoins de 106 à 312%), ce qui constitue dans le contexte actuel un gâchis en eau d'irrigation que l'agriculteur peut économiser pour améliorer davantage l'efficacité d'utilisation de cette denrée devenant de plus en plus rare. Ce dépassement est imputé à la régie des irrigations par les agriculteurs encore imprégnés de l'ancienne technique d'irrigation gravitaire peu efficace, au moindre coût et la meilleure qualité des eaux du barrage Bin El Ouidane comparativement aux eaux de la nappe

Sur le plan hydraulique toutes les installations étudiées fonctionnent normalement et ne présentent pour le moment aucune anomalie apparente de dysfonctionnement (Coefficients d'Uniformité d'arrosage élevés : 90 à 98 % avec une moyenne de 96 % et les meilleures efficacités d'application et globales obtenues : 90.41 à 90.67 % avec une moyenne de 90,54 % et 82 à 89% avec une moyenne de 86.84 % respectivement).

La pratique de fertigation n'est pas généralisée, ce qui ne permet pas aux agriculteurs de tirer profit des avantages de cette technique, notamment en matière de l'efficacité pour l'azote et la réduction du risque environnemental. Le contrôle des paramètres de l'injection a montré que le taux de solubilité des engrais n'est pas pris en considération, ce qui peut entraîner



avec le temps le dépôt des engrais non solubilisés dans le réseau de distribution. La concentration de la solution fille, variant de 0.48 à 34 g/l, dépasse parfois les normes de tolérance préconisées, ce qui peut affecter la croissance et le développement des cultures, la structure du sol et la qualité de l'eau de la nappe.

L'opération d'entretien et de maintenance du système d'irrigation n'est pas systématique et seul 19% des cas procèdent tantôt à des purges de conduites et parfois à un nettoyage des filtres de la station de tête. Des précautions doivent être ainsi prises dans ce sens, pour éviter le colmatage progressif du réseau pouvant avec le temps réduire la durée de vie de l'installation.

L'analyse des différents systèmes de production pratiqués, appréhendée par le ratio outputs/inputs montre que les scores les plus élevés sont généralement dégagés par les exploitations qui consomment moins d'inputs à l'hectare mais génèrent des produits à l'hectare les plus élevés. Ces types d'exploitations qualifiées d'efficaces sont moins consommatrices en eau d'irrigation et le valorisent mieux. Au contraire, les exploitations inefficaces utilisent plus d'inputs par hectare et génèrent moins d'outputs. L'analyse à l'échelle de la culture a mis en exergue de deux types d'exploitation :

- Celles caractérisées par une utilisation intensive des facteurs de production due à leurs capacités de se diversifier largement et intensifier leurs modes de production.
- Celles ayant peu de choix de diversification et jouent davantage sur la gestion des intrants.

Au terme de cette investigation, Il apparaît qu'un projet de modernisation de l'irrigation ne peut aboutir à tous les objectifs qu'on lui a assignés au départ sans qu'une bonne gestion ne soit ficelée car généralement les problèmes de reconversion sont plus liés à la gestion du système qu'à l'installation d'équipements d'irrigation localisée.

Sur la plan impact agro-économique, les changements engendrés par la transition à l'irrigation localisée sont en générale progressifs mais néanmoins perceptifs dès la première année du projet. S'agissant de l'allocation de l'eau d'irrigation, les agriculteurs privilégient l'utilisation des eaux de surface disponibles actuellement au moindre coût et de meilleure qualité comparativement aux eaux souterraines. Toutefois on note une économie substantielle de l'ordre de 30 % quand on analyse l'usage combiné des eaux de surface et celles souterraines. Ainsi, les objectifs initiaux de promouvoir une plus grande durabilité de l'utilisation de l'eau d'irrigation définie en terme de réduction de l'utilisation de l'eau de nappe et une utilisation exclusive de l'eau de surface sont atteints. Toutefois, Il convient d'assortir l'appui au développement à l'irrigation localisée de garde-fous (quotas annuels, tarifs dissuasifs et régie optimale des irrigations) pour une utilisation sobre des facteurs de production, à même de mieux

se parer des risques environnementaux, de pénuries, et de perte du capital humain et matériel investi.

L'étude des assolements pratiqués par les agriculteurs entre la situation de référence et celle d'après-projet, montre que la reconversion collective à l'irrigation localisée des systèmes d'irrigation gravitaire a eu un impact positif sur l'intensification culturale passant respectivement d'un taux de 107 à 125%. En effet, ce nouveau mode d'irrigation souple et à la demande restreinte, introduit dans la zone, représente un intérêt économique pour l'irrigant, lui permettant de sécuriser ses apports d'eau, de réduire les pertes d'eau dans les réseaux d'irrigation et à la parcelle, ce qui incite les agriculteurs à occuper davantage leurs sols en pratiquant aussi bien les cultures principales têtes d'assolement que les cultures dérochées en fin de saison.

Concernant le poste de main d'œuvre, la reconversion collective à l'irrigation localisée a engendré une réduction de la quantité de travaux liés à la conduite des cultures, ce qui a donc atténué les problèmes liés à la disponibilité de la main d'œuvre. Toutefois, une nouvelle demande commence à émerger pour la main d'œuvre qualifiée. Dans le contexte de cette transition, le poste de main d'œuvre représentant la dépense la plus importante de la structure du prix revient de presque toutes les cultures avec une moyenne de 25 et 49 % des charges globales respectivement pour la période d'avant-projet et celle d'après le projet.

A l'issue de la première année de mise en eau des secteurs reconvertis, le nouveau mode d'irrigation n'a pas affecté pour l'instant le mode de commercialisation. En effet, les agriculteurs restent fidèles à la vente sur pieds et les intermédiaires viennent à la recherche des productions.

En matière de valorisation de l'eau d'irrigation, l'amélioration des rendements quantitatifs conjuguée à une utilisation à bon escient de l'eau d'irrigation a permis une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation comparé au système d'irrigation.

Sur le plan agro-économique, l'effet de la transition à l'irrigation localisée sur les principaux paramètres agro-économiques est très marqué avec une amélioration moyenne des principaux indices de la plupart des cultures de 36 à 122 % par rapport à la situation d'avant-projet.

L'impact environnemental de la transition à l'irrigation localisée s'est traduit par une augmentation de la salinité par rapport à la situation de référence mais à des degrés différents selon l'horizon du sol prospecté. L'augmentation est très palpable au niveau de l'horizon superficiel (0 – 20 cm) et celui de profondeur avec respectivement une hausse de 32% (soit +0.66 ds/m) et 95% (soit +1.19 ds/m). L'horizon intermédiaire 20 – 40 cm a connu une légère

augmentation de l'ordre de 6%, soit 0.13 ds/m. L'irrigation et l'évaporation de l'eau de la surface du sol conduisent à l'accumulation des sels, ce qui entraîne un accroissement graduel des sels dans la zone racinaire. En zones d'agriculture intense comme le cas du périmètre du Tadla où l'eau d'irrigation est de bonne qualité avec un taux de salinité faible de l'ordre de 0.51 mS/cm pour les eaux de surface et de 2 mS/cm pour les eaux de nappe, la pratique de la fertilisation reste la cause majeure probable de la salinisation du sol et les aquifères. Les valeurs enregistrées restent en dessous des seuils de salinisation au-delà desquels la productivité des cultures est affectée.

L'état actuel de saturation du complexe absorbant et de la solution du sol en cations échangeables ou solubles, apprécié par le pH du sol, est actuellement dans la gamme des sols moyennement basiques à tendance alcaline contre des valeurs moyennes de 8.1 à 8.8 pour la situation de référence (Labomag, 2012). Cette situation, dont il faut tenir compte dans la pratique de la fertilisation, peut poser des problèmes d'assimilation des éléments minéraux comme le fer, le magnésium et le zinc par les plantes.

La conductivité électrique de l'eau de nappe a enregistré une augmentation 0.59 %, soit 0.01 mS/cm. Malgré cette augmentation, la salinité reste faible à moyenne et ne constitue pas à l'heure actuelle, une contrainte majeure en irrigation localisée.

L'effet des sels solubles sur le sol abordé à travers les risques liés au sodium ne se pose pas pour le moment du fait de l'absence des signes marquants de salinité des sols en surface et de problème de destruction de la structure du sol par alcalinisation (conductivité électrique moyenne de 2 mS/cm et faible SAR de 2.33). Les problèmes liés au Carbonate de sodium résiduel (le calcium et le magnésium peuvent réagir avec le bicarbonate et précipitent sous forme de carbonate, la concentration relative en sodium dans le complexe échangeable augmente et provoque la dispersion du sol) sont à écarter du fait que sa concentration est en dessous du seuil tolérable (<1.25 meq/l) à partir duquel l'eau devienne dangereuse.

Les données relatives au niveau piézométrique de la nappe montrent un rabattement de 2.59 m dû essentiellement à l'irrigation localisée ayant limité l'infiltration de l'eau vers la nappe.

Les résultats issus de l'expérimentation sur le pilotage de l'irrigation de la betterave à sucre ont porté sur :

- Le stock d'eau du sol fluctue entre un minimum de -4.98 mm/j et un maximum de 8.87 mm/j avec une moyenne journalière de 0.06 mm. Cette faible variation confère à la culture une alimentation hydrique stable et confortable.

- Les besoins en eau estimés par la formule de Penman Monteith (ETM) sont très corrélés ( $r^2 \approx 0.9$ ) à ceux mesurés par la méthode du bilan hydrique du sol (ETR)

- L'indice de stress hydrique : Crop water Stress Index (CWSI), servant au pilotage de l'irrigation en zones arides et à la quantification du stress hydrique est de 0.2 en moyenne, ce qui montre que l'ETR moyenne est maintenue proche de l'ETM (80 % ETM) conférant à la culture un confort hydrique durant tout son cycle cultural.

- Les paramètres agro-économiques ont enregistré un dépassement par rapport au témoin de 77, 31 et 170% respectivement pour le rendement en racines, la richesse saccharine et le rendement en sucre. Ces résultats peuvent être liés à la rationalisation des apports d'eau réduits au strict besoin de la culture et au moment opportun

- Le mode de pilotage adopté a procuré une économie d'eau d'irrigation de l'ordre de 28% comparativement à celui opté par l'agriculteur. Ce dernier, imprégné du mode d'irrigation gravitaire se base sur son expérience cumulée, ce qui conduit souvent à une gestion inefficace de la ressource et peut présenter des risques de pollution diffuse. En termes d'efficience (racines/m<sup>3</sup> eau et sucre/ m<sup>3</sup> eau) et de valorisation de l'eau d'irrigation, on note un net dépassement par rapport au témoin de 112, 176 et 91 respectivement.

- Les résultats afférents à la rentabilité de la betterave à sucre ont montré une nette supériorité du traitement étudié comparativement au témoin de l'ordre de 55, 38 et 70% respectivement pour le produit brut, le revenu et la valeur ajoutée à l'hectare.

- En matière d'instrumentation, les sondes capacitatives de technologie FDR semblent être des outils efficaces pour surveiller l'humidité et fournir des références sur l'utilisation de l'eau du sol.

Les différents paramètres contrôlés tant sur le plan édaphique que sur le plan performances agronomiques de la culture montrent que le mode de pilotage d'irrigation testé a créé à la culture les conditions hydriques favorables (humidité du sol reste entre la fourchette des humidités caractéristiques des sols de la zone d'étude Hcc : 249 mm et HpF : 138 mm durant tout le cycle cultural) lui permettant d'exprimer pleinement son potentiel de production tant sur le plan qualitatif que quantitatif.

## **II- Recommandations pratiques et perspectives d'avenir**

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail constituent une contribution à l'acquisition de références techniques sur le pilotage et les performances techniques de l'irrigation localisée et son impact environnemental et agro-économique.

Cette technique relativement nouvelle introduite au périmètre irrigué dans un cadre collectif offre de nombreux avantages mais exige en contre partie une excellente régie (quand et pendant combien de temps irriguer). L'utilisation d'outils de régie adaptés et l'analyse du mouvement de l'eau dans le sol permettent de répondre à ces interrogations. L'amélioration de la régie de l'irrigation localisée doit se faire en fonction des conditions opératoires et climatiques de l'exploitation. Si les sondes capacitatives utilisées dans la présente étude ont prouvé leur validité dans l'appréciation du statut hydrique et le mouvement de l'eau dans le sol, d'autres outils d'aide à la décision de l'irrigation doivent être testés pour régir adéquatement l'irrigation et mieux rationaliser les apports d'eau. La maîtrise de la durée et la fréquence des arrosages permettra de limiter les pertes par percolation et donc maximiser la ressource en eau. En matière d'instrumentation, les tensiètres ordinaires ou électroniques à transmission sans fil placés à différentes profondeurs du sol, Water Marc, petits lysimètres à drainages, Les thermomètres du sol et le matériel de mesure de l'humidité et la température des feuilles peuvent répondre à ces différentes interrogations.

La télédétection spatiale permet à cet effet, l'appréciation de l'évapotranspiration du couvert végétal et donc estimer les besoins en eau de différentes cultures pratiquées dans le périmètre irrigué du Tadla.

En maîtrisant les besoins réels des cultures, il va falloir aussi concevoir un réseau d'irrigation adéquat pour éviter les pertes en cours de route et à la parcelle. Parallèlement à l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des eaux superficielles, une attention particulière doit être aussi accordée aux eaux souterraines. Ainsi, il va de soit d'assortir l'appui au développement à l'irrigation localisée de garde-fous notamment en matière de :

- Choix des cultures très efficaces et mieux valorisantes de l'eau d'irrigation,
- Adoption de la notion de quotas annuels par hectare à ne pas dépasser par les usagers agricoles,
- Application de tarifs d'eau d'irrigation plus dissuasifs pour amener l'agriculteur à rationaliser sa dotation en eau et donc alléger sa facture de consommation de l'eau d'irrigation.

L'adoption d'une régie raisonnée de l'irrigation s'avère fort probablement le meilleur choix pour mieux :

- Se parer des risques de pénurie d'eau et de perte du capital humain et matériel investis,

- De rejoindre un optimal agronomique et économique,
- Se prévenir du risque environnemental,
- D'assurer la durabilité du projet et atteindre les objectifs qui lui sont assignés au départ.

Avec les changements dans la vocation des Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole (ORMVA) et l'achèvement de l'assistance technique initiée dans le cadre du projet de la reconversion collective à l'irrigation localisée, l'Office National du Conseil Agricole (ONCA) pourra à cet effet assurer la relève et jouer ainsi, un rôle important dans l'accompagnement et l'encadrement des agriculteurs de la région en les incitant aux bonnes pratiques agricoles efficaces, résilientes et préservant l'environnement.

La nécessité d'intégrer l'ensemble des facteurs de raisonnement qui oriente la démarche vers la conception et la création d'un service-conseil capable de répondre à toutes les interrogations et préoccupations des irrigants au sein d'une zone nouvellement convertie collectivement à l'irrigation localisée s'impose à l'évidence et trouve sa justification dans le besoin des agriculteurs à un vrai accompagnement capable de réussir cette transition. Les aspects sur lesquels il faut dispenser des formations aux usagers agricoles notamment les aspects liés aux besoins en eau des cultures et les modalités d'application, maîtrise de la fertigation et les traitements phytosanitaires.

Parallèlement à ces mesures, l'instauration d'un observatoire de suivi-évaluation des performances techniques réalisées par les agriculteurs de la zone de reconversion collective est nécessaire en vue de la rectification du tir à temps pour perdurer le projet.

Les résultats issus de l'expérimentation sur l'usage de l'approche climatique dans la conduite de la betterave à sucre sont très concluants et méritent d'être vulgarisés aux usagers agricoles en vue d'une large transposition de ces acquis à l'échelle de toute la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée. Il apparaît clairement que l'approche climatique basée sur le référentiel journalier de Penman Monteith est tout à fait valable dans le contexte du Tadla pour prédire les besoins en eau et planifier les arrosages de la betterave à sucre. Ce modèle empirique pourrait à cet effet être un outil efficace pour une régulation optimale des irrigations évitant tous les risques de gaspillage et de pollution diffuse.

Les efforts consentis pour l'adoption de techniques économes en eau d'irrigation doivent aller de pair avec un accompagnement des agriculteurs en vue d'apporter le soutien nécessaire (formation...) en vue d'atteindre les objectifs tracés. La globalité du processus est donc à maîtriser en vue de satisfaire aux exigences de qualité des consommateurs et la recherche de meilleures valorisations de l'eau dans un contexte de développement durable.

Il convient donc d'assortir l'appui au développement de l'irrigation localisée d'un accompagnement rapproché des usagers agricoles pour une conduite opportune et économe, réduite aux stricts besoins en eau de la culture assurant une utilisation sobre des facteurs de production et se parer aux problèmes environnementaux.

En vue d'une connaissance plus affinée sur les aspects liés au pilotage des arrosages, les performances de l'irrigation localisée et les interactions entre les contextes hydrauliques et agro-économiques, il faudrait réaliser également d'autres essais dans d'autres zones de cultures avec des répétitions aussi bien dans le temps que dans l'espace

Cette contribution constitue une esquisse à la recherche scientifique pour aborder d'autres Thématiques ayant traits notamment au développement d'outils de pilotage et d'avertissement à l'irrigation, simples et maîtrisables par les usagers agricoles.

L'organisation des agriculteurs autour de projets d'agrégation et l'adoption de filières porteuses à forte valeur ajoutée permettra aux agriculteurs d'écouler facilement leurs productions et profiter des prix intéressants du marché.

Le présent travail n'est qu'une ébauche et constitue un pas dans la démarche scientifique sur le quel peut s'ateler d'autres chercheurs pour d'une part contribuer au développement de certains aspects sommaires et d'autres part faire des investigations sur d'autres axes de recherches émanant de cette étude. Pour étendre l'utilité de ce travail dans le domaine de la gestion de l'eau d'irrigation, certains axes de recherche saillants méritent d'être abordés :

- Diagnostic des systèmes d'irrigation et élaboration de guides pratiques d'entretien et de maintenance du réseau d'irrigation sous pression.

- Planification et choix d'un système approprié d'avertissement à l'irrigation localisée.

- En terme d'instrumentation, d'autres outils d'aide à la décision de l'irrigation méritent d'être testés :

- . Cas de petits lysimètres à drainage pour quantifier les besoins en eau des cultures et la pollution diffuse due à l'usage non rationnel de l'eau d'irrigation, des fertilisants et les produits phytosanitaires).

- . Outils de mesure de la tension de l'eau dans le sol (cas des tensiètres), contrôle de la température et de l'humidité du végétal notamment au niveau des feuilles et des tiges de la plante.

- Usage de la télégestion et de télé-contrôle des systèmes d'irrigation localisée pour la rationalisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation à la parcelle.

- Etude de la dynamique de l'eau dans le sol et utilisation d'outils de régulation adaptés

- Application de la télédétection spatiale dans la gestion des irrigations.

- Optimisation de la pratique de la fertigation pour une bonne efficacité des fertilisants et la sauvegarde de l'environnement.
- Amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'eau dans les systèmes de culture irrigués au Tadla
- Etude minéralogique de l'eau du barrage du barrage Bin El Ouidane en vue d'une solution au problème de turbidité de l'eau d'irrigations en périodes de crues.
- Impact de la reconversion à l'irrigation localisée sur les assolements pratiqués par les agriculteurs et les aspects agro-économiques (modélisation économique).
- Etude des faciès physico-chimiques de eaux superficielles et souterraines et leurs impacts sur la dégradation des sols.
- Etudes fréquentielles du climat (occurrence des événements climatiques : sécheresse, gel, chergui, fortes averses...).
- Stratégies d'adaptation de la gestion des ressources en eau aux changements climatiques
- Dans le contexte des changements climatiques : Elaboration de manuels d'information pour une adaptation effective à ces changements.
- Impact de la reconversion des systèmes d'irrigation gravitaires à l'irrigation localisée sur la durabilité de l'environnement en matière de prélèvement des eaux souterraines.



**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abouattallah A., (2014). Rapport de formation sur le diagnostic d'une installation d'irrigation localisée au profit ORMVAT.
- Al-kaisi Mahdi M., Lowery Birl, (2017). Fundamentals and Functions of soil Environment. In Soil Health and intensification of agroecosystems.
- Allen R.G et al., (1999): Bulletin n°56, FAO, crop evapotranspiration Guidling for comperting crop water requirements FAO, Irrigation and drainage paper n° 56 FAO. Rome Italy.
- Ammari O. et Bayali N., (2016). Etude des pratiques d'irrigation et évaluation des performances de l'irrigation localisée dans le cadre de reconversion collective : Cas du secteur pilote du Tadla. Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie rural, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, 119 p.
- Ayer et Wisot D., (1976). Qualité de l'eau pour l'agriculture- Bulletin d'irrigation et de drainage n°29 FAO. Rome.
- Aylaji M., Lhadi EL K., Kabil M. et Ouaaka A., (2001). Impact de la salinité de l'eau sur la qualité du sol et la betterave à sucre Beta vulgaris L. Déchets-Revue Francophone d'Ecologie Industrielle- N°24, 4em trimestre 2001.
- Balas B., Boussaguet JM., Lacroix B., Perarnaud V., Peyremorte P., Revol P., Ruelle P., Specty R., Deumier JM., Ltier B., Isberie C., Bouthier E., Belluau F., LeDoré F., Ailliot B., Boussaguet J., Martinez AM., Ramel JP., Rivoire B., Merrien A., (1995) - La conduite de l'irrigation- de la stratégie au pilotage de l'irrigation- Cemagref, Réseau National Expérimentation Démonstration-secteur hydraulique agricole (RNEDHA).
- Bekkar Y., Kupper M., Hammani A., Dionnet, Eliamani A., (2007). Reconversion vers des systèmes d'irrigation localisée au Maroc, quels enseignements pour l'agriculture familiale. Revue HTE N°137 JUIN 2007.
- Belabbes K., (2004). Rapport de prestation d'expertise sous le thème : Besoins en eau des cultures dans le périmètre du Tadla. Projet d'initiative propre : Ecobilans appliqués à l'agriculture et formation des conseillers agricoles en environnement au Maroc (EFCA-PIP). Composante : IAV Hassan II Rabat-Elaboration d'un modèle d'écobilan pour l'évaluation environnementale de l'agriculture irriguée ai Maroc- Cas du périmètre du Tadla-
- Belabbes K. (2006). Tableur de calcul de L'évapotranspiration de référence ET° par le référentiel journalier de Penman Monteith. Departement de genie rural IAV hassan II Rabat Maroc.

- Belabbes, K., (2013). Calcul pratique des besoins en eau des cultures en irrigation localisée. Cours de 5<sup>ème</sup> année Génie Rural-IAV Hassan II, Rabat
- Belghiti M., (2009) - Le Plan national d'économie d'eau en irrigation (PNEEI) : une réponse au défi de la raréfaction des ressources en eau. 12<sup>ème</sup> Conférence Inter Régionale Enviro Water/ Résumés des Communications Orales. Revue HTE.
- Belghiti M'Hamed, (2012), L'Economie et la valorisation de l'eau en irrigation : un impératif pour un développement agricole durable au Maroc, Conférence internationale pour le dessalement et le développement durable ,1-2 Mars 2012, Casablanca.
- Benouniche M., Kuper M., Hammani A., (2014). Mener le goutte à goutte à l'économie d'eau : Ambition réaliste ou poursuite d'une chimère ? Alternatives rurales (2).
- Berrouch H., (2011), Etude de la qualité des eaux d'irrigation et du sol dans le périmètre de Saâda (Région du Haouz), MFE, FST Marrakech.
- Boualla N. (2018). Interaction eau - sol en milieu salin (cas du bassin de la Grande Sebkhia d'Oran). These de Doctorat - Faculté d'Architecture et de Génie Civil - Département de Génie Civil - Spécialité : Génie Civil - Option : Géomatériaux – 159p -
- Bouazzama B., (2013). Amélioration de l'EUE chez les principales cultures fourragères au Tadla. Thèse de doctorat. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech
- Bouazama B. et al., (2015). Effet du déficit hydrique sur la croissance, le rendement et l'efficience d'utilisation de l'eau chez la luzerne au Tadla.
- Bouazama B. et Bahri A., (2007). Evaluation des performances des installations de l'irrigation localisée au niveau des exploitations agrumicoles du Tadla. Revue HTE N°136.
- Bouaziz A. et Belabbes K., (2002). Efficience productive de l'eau en irrigué au Maroc. Revue H.T.E. N° 124.
- Bousquet N., (2014). Quelles potentialités pour le goutte à goutte en grandes cultures ? le goutte à goutte au banc d'essai-ARVALIS-
- Boutheina D. et Boujelbane A., (2010). Effet du système d'irrigation localisée au goutte à goutte souterrain sur une culture d'aubergine. Station expérimentale de L'ISA Chott Mariem, Délégation Akoura, Gouvernorat de Sousse Tunisie. Actes des 17<sup>èmes</sup> journées scientifiques sur les résultats de la recherche agricole.
- Boutheina D., Boujelben A., Mguidiche B.A et Harrabi R., (2012). Dynamique de l'eau dans le sol sous un système d'irrigation localisée souterrain. ISA de Chott Mariem, Université de Sousse, Tunisie.
- Burnod P. et Medernach K. (2015) - Interrelations entre agro-industrie et agricultures familiales vues par le prisme du système agraire. Cahiers Agricultures, 2015 - revues.cirad.fr.

- Cattivelli F., Rizza F., Badeck FW, Mazzucelli E., (2008). Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field crops research*, 105(1-2), 1-14, 2008.
- Chenini F., Trad M., Rejeb S., Chaabouni Z., (2002). Optimisation et durabilité du traitement et de l'utilisation des eaux usées en agriculture (Tunisie).
- Chiemeka, I.U, (2010). Soil temperature Profile at Uturu, Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*. 11(1):478-482. <http://www.akamaiuniversity.us/PJT.HTM>
- Clément R., Galand A. et Meylan J. (1990). Systèmes d'irrigation.
- Combres J.C. et Le Mezo L., (1999). Le pilotage de l'irrigation : de la parcelle au périmètre irrigué. *Agriculture et développement* ° 24, pp : 100-105.
- Compaore M.L., (2003) - Cours de micro irrigation- E1.E.R.
- Couture G, (1997). Hydrogéochimie d'eau souterraine dans la ceinture Meta sédimentaire centrale de la province géologique du Grenville, Québec. Université du Québec INRS-Géo ressources. Mémoire pour l'obtention du grade de Maitre ès sciences de la terre (M.SC.). Tg0030.pdf
- Daoudi H., (2016). Modernisation du mode d'irrigation et son impact sur la production agricole et sur la population riveraine. Cas de la zone d'Oulad Illoul. Périmètre du Tadla.
- Delarue Jocelyne, (2007). Mise au point d'une méthode d'évaluation systémique d'impact des projets de développement agricole sur le revenu des producteurs. Etude de cas en région kpèlè (République de Guinée).
- Déroche O., (2017). <http://irrigazette.com/fr/articles/le-pilotage-de-lirrigation-des-outils-varies-pour-des-besoins-differents>; chambre d'agriculture de la Charente-Maritime. *Irrigazette international* 02 octobre 2017.
- Dimatit (2015) tube PVC pression. <https://www.facebook.com/1629254397323585/posts/1629257697323255/>
- Dionnet M., Kuper M., Garin P., Hammani A., Eliamani A., Saaf M., (2006). Accompagner les acteurs dans le changement de leur système. Un jeu de rôles pour des projets collectifs d'irrigation au Tadla, Maroc. Actes du séminaire Wademed, Cahors, France.
- Donkora Kambou., Dimitri Xanthoulis, Korodjouma Ouattara & Aurore Degré, (2014) « Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique) », *Base* [En ligne], Volume 18, Numéro 1, 108-120.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., (1975). Les besoins en eau des cultures. FAO 24. Bulletin d'irrigation et de drainage N° 24.

- Douzi J. et Jorti A., (2015). Etude des pratiques d'irrigation et évaluation des performances de l'irrigation localisée dans un secteur de reconversion collective : cas de Boulaouane (Doukkala).
- Draycott.A.P, (1972). Sugar-beet nutrition. Applied Science. Publishers LTD. London. 188-197.
- ELAME M.T., (2017). La productivité du maïs ensilage sous irrigation localisée dans le périmètre irrigué du Tadla. Mémoire Fin Etude pour l'obtention de diplôme d'ingénieur agronome, option productions végétales, IAV Hassan II Rabat.
- El Amri A., Majdoub R., M'Sadak Y., Aouichaoui G., (2012). Appréciation expérimentale de l'uniformité de distribution de l'eau dans le périmètre irrigué ZAAFRA II (Tunisie centrale), Larhyss / journal n°11.
- El Amri A., M'sadak Y., Majdoub R., Ben Ayed S., (2014) : Efficience technique de l'utilisation de l'eau d'irrigation en milieu semi-aride. Journée nationale sur la valorisation des résultats de la recherche dans le domaine des grandes cultures, Tunis.
- ELAttir H., (2005). Conduite et pilotage de l'irrigation goutte à goutte en maraichage. Bulletin mensuel n°124 d'information et de liaison du PNTTA, transfert de technologie en agriculture. IAV Hassan II Rabat, 10p.
- FAO, (1983). Bulletin n° 36 de la FAO qui correspond à l'irrigation localisée.
- Ferraton N. et Touzard I. (2009). Comprendre l'agriculture familiale- Diagnostic des systèmes de production- collection agriculture tropicales en poche éditions. Quae, presses agronomiques de Gembloux.
- FAO, (1983). Bulletin n° 36 de la FAO qui correspond à l'irrigation localisée.
- Ferti-pratiques n°34 Unifa Février 2015.
- Filali Z., (2008). Evaluation ex-post des projets individuels et collectifs de reconversion en irrigation localisée Cas de Tadla et de Souss Massa. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie rural, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, 174p
- Florides Georgos and Kalogirou Soteris, (2004). Measurements of Ground Temperature at various Depths. [Ktisis.cut.ac.cy/bit Stream/10488/870/3/C55-PRT 020-SET 3.pdf](http://Ktisis.cut.ac.cy/bit%20Stream/10488/870/3/C55-PRT%20020-SET%203.pdf).
- Gabriel H., (2014). Fiche technique : le goutte à goutte de surface et enterré sur culture de maïs. Chambre d'agriculture de Tarn janvier 2014.
- Gamo, 1999. Classification of arid regions by climate and vegetation. Journal of arid and studies, 1, 9-17, 1999.

- Ghesquière Ombeline, (2015). Caractérisation de la géochimie des eaux souterraines et des facteurs la contrôlant dans les régions de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord. Université du Québec à Chicoutimi. Constellation.uqac.ca
- Gouaidia L, Guefaifia O. Boudoukha A., LaidHemila M. et Martin C, (2012). Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). Vol 6, 2012 p. 141-160 <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2632>
- Gosselin L., Bergeron D., Noreau J., (2006). La gestion de l'eau en fraisier. Colloque sur l'irrigation – l'eau source de qualité et des rendements- CRAAQ/comité de légumes (Quebec).
- Granier J., Deumier J.M., (2013). Efficience hydraulique et énergétique : les nouveaux critères de performances pour les systèmes d'irrigation du futur, Sciences eaux et territoires, N. 11, pp.98.
- Green Solution, (2013). Document sur les nouvelles approches pour une meilleure gestion d'irrigation localisée. Marche 36/2012/TA : la fourniture du matériel technique d'avertissement à l'irrigation et du contrôle des performances des équipements de l'irrigation localisée dans le périmètre du Tadla, Green Solution.
- Hammani A., Kuper K., Bouarfa S., Badraoui M., Bellouti A., (2005). Evolution de l'utilisation conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla (Maroc). Actes du séminaire « Instruments économiques et modernisation de l'agriculture irriguée en Méditerranée » Kairouan, Tunisie, projet WADMED.
- Hammani A., Debbarh A. et Kuper M., (2011). Les ressources en eaux souterraines et leurs impacts sur la dynamisation de l'agriculture dans un périmètre de grande hydraulique irrigué par les eaux de surface (cas du périmètre irrigué de Tadla au Maroc. HTE N° 148 - Mars / Juin 2011.
- Hammani A., (2015). Techniques de gestion des nappes d'eau souterraines en zones interne et externe du réseau hydro-agricole relevant d'un périmètre irrigué. Module de formation du 23-26 Novembre 2015 à l'ORMVAT.
- Hanafi S., (2011) - Approche d'évaluation de la performance des systèmes irrigués à l'échelle des exploitations agricoles- cas du périmètre irrigué de Brj Toumi (vallée de la Medjerda-Tunisie).
- Harbouze R., Le Grusse Ph., Belabes K., Raki M., Bouaziz A., et al., (2009). Efficiences économiques comparées des systèmes de production dans différentes situations d'accès à la ressource en eau. Application dans le périmètre irrigué du Gharb, Maroc. Hartani T., Douaoui

- A., Kuper M. Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb, 2008, Mostaganem, Algérie. Cirad, 16p. (2009), colloque- CD-Rom.
- Hedi Ben Ali., Hammami M., Boukchina R. et Saidi A., (2014). Etude comparative entre le système goutte à goutte de surface et le système enterré pour l'irrigation d'une culture de pomme de terre. International journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 VOL 6 N°4, pp. 860-870.
  - Hoffmann M. et Jungk A., (1996). Influence of soil temperature and soil compaction on growth and uptake of sugar beet. Journal of plant nutrition and soil science 159(3).
  - Jami M. & Eul-Shik Rha, (2004), the effect of salinity (NaCl) on the germination and seedling of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and cabbage (*Brassica oleracea* L.). Plant resources vol7 N° 3 (p226-232).
  - Kambou D., Dimitri Xanthoulis, Korodjouma Ouattara & Aurore Degré, (2014) « Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique) », *Base* [En ligne], Volume 18, Numéro 1, 108-120.
  - Labomag, (2012). Rapport fin hiver : Caractérisation de référence des paramètres environnementaux au niveau de la zone de reconversion collective à l'irrigation localisée.
  - Laguig, S., (2014). Performances des systèmes de cultures sous irrigation localisée dans le périmètre irrigué de Tadla, IAV Hassan II, Rabat: Mémoire du troisième cycle pour l'obtention diplôme d'Ingénieur d'Etat en Agronomie.
  - Laiti A., Penadille Y., Chati T., (2004) -Action des laboratoires d'essais dans le processus de modernisation des irrigations. Hammani A., Kuper M., Debbarh A. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée. Rabat, Morocco. IAV Hassan II, 16p-CIRAD-
  - Lamm FR., Ayars JE. Et Nakayama, (2006), Micro irrigation for crop production, Design, operation and Management.
  - Landreau A. et Monition L., (1977), Nouvelle évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. US Salinity Laboratory Riverside.
  - Laraque A., Critères de qualité des eaux pour un usage en irrigation (évolutions et prévisions dans les açudes du Nordeste brésilien semi-aride),
  - Lidon B., Marlet S., et Clopes A. (1999). Evaluation des performances des arrosages de la canne à sucre irriguée à la raie. Agriculture et développement N°24, pp : 100-105.
  - Maraliane H., Tobeh A., Amiri S., Didar – Talesh Mikail R. et Aghabarati A., (2008). Effects of sowing date and limited irrigation on root yield and quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.), Asian Journal of plant sciences 7(3) : 298-303.

- Masmoudi A., (2011). Effet de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol et le végétal. *Courrier du savoir*-n° 11, pp.61-69.
- Massatbayev K., Izbassov N., Nurabaev D., Kydrali M., Shomantayev A. et Massatbayev M., (2016). Technologie and regime of sugar beet drip irrigation with plastic mulching under the conditions of the jambly region. *Irrigation and Drainage*, vol 65, issue 5, p 620-630
- Mengoub F.Z, Doukkali M.R, Lejars et Le Grusse P., (2014). Evaluation de l'impact économique de la politique de reconversion des systèmes d'irrigation gravitaire en système d'irrigation localisée. *Les économies d'eau dans les systèmes irrigués : Retour d'expériences au Maroc et à l'international*, Rabat.
- Moghli, E. & Benjelloun, T. M., (2000). Valorisation de l'eau d'irrigation par les productions végétales dans les grands périmètres irrigués au Maroc. *Hommes Terres et Eaux*, Issue 116, pp. 30-38.
- Molden, D.J., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., Fraiture, C., Klooezen, W., (1998). Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. *Research Report 20*. International Water Management Institute: Colombo.
- Mounaïme, (2016). Pilotage de l'irrigation localisée des grandes cultures, des cultures maraichères et des plantations. *Rapport de formation au profit du personnel de l'ORMVA TADLA*
- Mouradi A., AIT Yacine Z., EL Harti A., (2018). Study of the technical performance of localized irrigation and its environmental and agro-economic impact in the first areas of collective reconversion at the irrigated perimeter of the Tadla - Beni Moussa perimeter of the west – Morocco. *E3S MATEC Web of Conférences 37*, 01009 (2018) EDE6-2017.
- M'Sadak Y. et al., (2017). Évaluation Expérimentale de l'Irrigation par Aspersion Non Mécanisée dans le Contexte Tunisien. *Revue Agriculture* vol. 8 n°1 (2017) 39 – 48  
<https://revue-agro.univ-setif.dz/documents-agri/Volume8-N1-2017/MSADAK-al.pdf>.
- Nadon, S., D. Bergeron, C. Boivin et J. Vallée., (2016). Création et validation d'un feuillet technique sur la performance de systèmes d'irrigation par aspersion et par goutte à goutte en champ. *Rapport final remis au RLIO. IRDA*. 59 p.  
Projet no. 1516-4051-013QC. Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement. Irda, Agriculture, Pêche et Alimentation.  
[https://www.agrireseau.net/documents/Document\\_92081.pdf](https://www.agrireseau.net/documents/Document_92081.pdf)
- Ncibi K, Gaaloul N, and Gasmi A, (2016). Contribution de l'analyse multivariée et des SIG pour la caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid (Tunisie centrale). *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324



- Noomene, H., (2011), Etude de la salinité des sols par la méthode de détection électromagnétique dans le périmètre irrigué de Kalàçat Landelous en Tunisie : cas d'une parcelle de courge
- Oulli L., (1993). Effet du régime d'irrigation sur le rendement et la qualité technologique de la betterave à sucre dans le périmètre des DOUKKALA, Mémoire de 3<sup>o</sup> cycle. Option Génie Rural, IAV Hassan II, Rabat, Maroc.
- ORMVAT, 2 : Localisation géographique des AUEA du Tadla
- ORMVAT,3 : Localisation de la première tranche de reconversion collective
- ORMVAT, (2016), Suivi de la qualité des eaux d'irrigation.
- ORMVAT, (2016c) : Premiers résultats en matière de valorisation de l'eau d'irrigation. Conférence sur la valorisation de l'eau d'irrigation pour une meilleure adaptation aux changements climatiques : les acquis et perspectives du Plan Maroc Vert. 14/07/2016, Agadir, Maroc.
- ORMVAT, (2016b). Cartes du parcellaire du périmètre du Tadla.
- ORMVAT (2017). Suivi de la qualité des eaux souterraines et superficielles.
- Papy F., (1973). L'élaboration du rendement de la betterave à sucre. Hommes Terres et Eaux N° 9.
- Penadille Y., (1998). Cemagref. Irrigation localisée. Formation SAAD. Rapport de formation 131 pages.
- Petitguyot T., Rieu T., Chohin-Kuper A., Doukkali R., (2005). Modernisation de l'agriculture irriguée et durabilité des ressources en eau dans le périmètre du Tadla au Maroc.
- Phocades A., FAO, Rome (2008). Seconde Edition : Manuel des techniques d'irrigation sous pression. Chapitre 7.14
- Rebecca Shortt, Anne Verhallen, Pam Fisher, (2011). Fiche technique MAAO : Surveiller l'humidité du sol pour améliorer les décisions d'irrigation.
- Renault D. (2008). Etapes et stratégies de l'élaboration des politiques de gestion des ressources en eaux agricoles. Enseignements de programmes de modernisation menés en Asie. Programme de formation aux politiques de la FAO, EASYPOL.
- Richard G.Allen, Marvin E.Jensen, James L. Wright and Richard D. Burman, (1989). *Operational estimates of reference evaporation*. Doi: 10.2134/agron. J.
- Robert Morris and Dr. Dale Devitt, "Sampling and interpretation of landscape irrigation water", University of Nevada [https://www.lenntech.fr/applications /irrigation /toxique /irrigation/ions-toxiques-risque-pour-](https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/toxique/irrigation/ions-toxiques-risque-pour-)

- ROUABHIA A.E.K. et DJABRI L. (2010). L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El MA EL Abiod. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, pp. 55-67.
- Sakellariou-Markantonaki M., Kalfounzos D. and Vyrlas P., (2002). Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. The Int. J. Vol 4, N° 2-3, pp 85-91, 2002
- Saltani A., Mailhol J.C, Zairi A., Château G., Ajmi T., (2004). Actes du séminaire Modernisation de l'agriculture irriguée Rabat. Analyse et diagnostic de la pratique de l'irrigation localisée dans les périmètres publics irrigués de la basse vallée de la Medjerda en Tunisie.
- Sanchez C.A. et Silvertooth J.C., (1996). Managing saline and soil for producing horticultural crops, Hort Technologie, April-June 1996, 6(2).
- Sharmasarkar F.C, sharmasarkar S, Held L.J, Meller S.D, Vance G.F et Zhang R., (2001). Agro-economic analysis of irrigation of sugar beet production. Agronomy Journal, vol 93, N° 3, p 517-523.
- Sidikou A., (2016). Efficacité d'utilisation de l'eau dans les systèmes de culture du périmètre irrigué du Tadla.
- Saitter M., Mermoud A., et Musy, (2007). Ingénierie des eaux et du sol, processus et aménagements.
- SCET-SCOM/INGEMA, (2009). Etude des projets d'exécution pour la reconversion collective à l'irrigation localisée des systèmes d'irrigation existants dans le périmètre du Tadla. Mémoire explicatif.
- SUTA, (2016). Bilan de la campagne betteravière au titre de l'année 2016 au Tadla.
- Tangara B., Ouolguem B., Kagone H., Sidibe A., Dembele D., 1996, Irrigation goutte à goutte, une technologie appropriée pour la production de la patate douce en zone sahélienne au Mali. Séminaire régionale du projet du management de l'irrigation au Burkina Faso, Ouagadougou.
- Tijani N. et Baala S., (2016). Impact du projet de reconversion à l'irrigation localisée sur les prélèvements des eaux souterraines dans le Tadla. Mémoire de Fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie rural, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, 95p.
- Topak R, Süheri S. and Acar B., (2011). Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. January 2011, Volume 29, Issue 1, pp 79–89.
- Topp G.C. and Davis J.L., (1985). Time-Domain Reflectometry (TDR) and Its Application to Irrigation Scheduling.

- Tron G., Isberie C., Chol P., (2000). La tensiométrie pour piloter les irrigations- Une gestion raisonnée de la ressource en eau. Educagri, Edition 2000.
- Vallée J., Boivin C., Bergeron D., Audet R. et Chrétien F., (2014). Comparaison et évaluation d'outils de gestion de l'irrigation. Rapport final remis au CDAQ. IRDA, 74 p.
- Vermeiren J., (1983) - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n°36- l'irrigation localisée : calcul, mise en place, exploitation, contrôle du fonctionnement- FAO, 220p.
- Verveka K., (1985). Effet of soil moisture and aeration on the emergence of raw and pelleted sugar beet esd. Acta. Agronomica Academica Scientarum 34(3/4), 326-331
- Won-Ho Nam; Jin-Yong Choi; Soon-Kim Choi. Eun-Mi Hong; Sang-Ho Jeon; Seung-Oh Hur, (2012). Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers Vol 54 N° 4, pp. 29-38, July 2012.
- Yacoubi Samir, Slatni Adel, Oueslati Taoufik, Zayani Khémaies, 2015. Interaction entre performances de l'irrigation par aspersion et réponse à l'eau d'une culture de pomme de terre Revue des Régions Arides n°37 (2/2015) ; pp :131-142
- Zyani K., Dali N., Alouini A., Hadj Taieb M. (2000). Evaluation de l'irrigation localisée de la vigne de table dans la région de Mornag. In: Lamaddalena N. 5ED°. Annual Meeting of the Mediterranean Network on Collective Irrigation Systems (CIS\_Net). Bari : CIHEAM, p.105-119 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches ; n.31).

## REFERENCE WEB GRAPHIQUE

- <http://C:/Users/user/Downloads/53305b8054214.pdf>. Réhabilitation de la culture de la betterave sucrière en Algérie.
- <http://C:/Users/Admin/Desktop/Sondes%20capacitives%20AquaCheck%20pour%20piloter%20l'irrigation%20-%20Corhize.pdf>. Pilotage irrigation nutrition - sondes capacitives aqua check pour piloter l'irrigation- CORHIZE solution to pilot growth.
- <http://C:/User/Admin/Download/irrigation-cours 2016->
- <http://www.Lenntech.fr/applications/irrigation/salinité/irrigation/salinité-risque-irrigation.htm>.
- <http://bacteries-champignons.blogspot.com/2012/04/fertigationfertilisation-de-la.html>. Fertigation /Fertilisation de la betterave à sucre.
- <http://www.institut-betterave.asso.fr/apps/accesbase/bindocload2.asp?d=25917&t=0&uid=57305290&sid=57305290&idk=1&idobj=0MTefbm0>. Culture de la betterave sucrière 2012-2013. Raisonner l'itinéraire betterave. ITB
- <https://irrigazette.com/fr/articles/les-techniques-d'irrigation-agricole>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation>
- <https://arrosage.ooreka.fr/comprendre/irrigation>
- <http://www.Senagriculture.com/article/coup-d'œil-différentes>
- <http://blog.agriconomie.com/les-modes-d'irrigation-présentation-et-comparaison/>
- <http://eriser.ma/techniques-d'irrigation-agricole/>
- <https://www.oecd.org/fr/sti/biotech/1946188.pdf>
- <https://hydram.epfl.ch/docs/Irrigation-basic.pdf>
- <https://tice.agroparistech.fr/cours-en-ligne/courses/Phytotechnie/document/Phytotechnie/pdf/betterave.pdf>. Betterave sucrière, 2003)
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Betterave>
- Les éléments toxiques dans l'eau d'irrigation. Extrait des Directives Australiennes de Qualité de l'eau pour Eaux Fraîches et Maritimes (ANZECC). <https://www.lenntech.fr/applications/irrigation/toxique/irrigation/ions-toxiques-risque-pour-eau-irrigation.htm#ixzz6pPa2r2fX>

# ANNEXES

## FICHE D'ENQUETE

### I- Identification des exploitations :

N°	Mle	Antenne	Noms	Sup	Groupe	Code	Code	Prise	Prise
			Prénoms	(Ha)	Irrigant	Parcelle	Client	Propriété	Bloc
1									
2									
,									
,									

### II- Niveau scolaire

Exploitants	Niveau			
	Sans	Primaire	Secondaire	Terminal Supérieur
1				
2				
,				
,				

### III- Occupation du sol

Cultures Pratiquées	Sup (Ha)	
	Avant-Projet	Après Projet
1		
2		
3		
.		
,		

### IV- Intensification Culturelle

Exploitations	Cultures Principales		Cultures en Dérobées	
	Espèces	Sup (Ha)	Espèces	Sup (Ha)
1				
2				
3				
,				
,				

**V- Pratique de la fertigation**

- Analyses du sol : oui  / non

- Présence du matériel : oui  / non

- Adoption du système : oui  / non

- Usage des engrais :

Exploitations	Type	moment	Quantité	Vol, eau	Temps	Durée rinçage
	Engrais	Apport	Apportée	Utilisé/fut	vidange fut	Après fertigation
1						
2						
,						
,						

**VI- Entretien préventif du système d'irrigation**

Oui  / non  Si oui :

Fréquence :

Produits Utilisés : Types et Quantités

Périodes :

**VII- Enquête technico-économique**

**Revenus de l'exploitation :**

Cultures	Superficie (Ha)	Production Avant-Projet	Prix
			Unitaire (DH/kg) Après Projet
1			
2			
,			
,			

**I. Charges d'exploitation :**

**- Travail du sol :**

Cultures	Propre matériel	Matériel loué		NJT	Mo	Coût	Coût total à
	Type	Gasoil (DH)	Type		Valeur locative	par jour	Mo/j
1							
2							
,							
,							

NJT : Nombre Journées Travail

Mo : Main d'œuvre



- **Plantation ou semi** :

culture	Dose	Prix	Matériel	Coût	Mo	Mo	Mo	Mo
	semis	DH/ha	utilisé		Nbre	NJT/ha	DH/j	DH/ha
1								
2								
,								
,								

NJT : Nombre Journées Travail

Mo : Main d'œuvre

- **Fertilisation** :

cultures	Date	Type	Quantité	Prix	Coût Total
	Application	Engrais	(Kg)	(DH/Kg)	(DH/ha)
1					
2					
,					
,					

- **Produits phytosanitaires** :

cultures	Date	Type	Quantité	Prix	Coût Total
			(Kg)	(Kg/ha)	(DH/ha)
1					
2					
,					
,					

- **Irrigation** :

Cultures	Irrigations	Date	Quantité	Prix	Coût Total	Origine
		Apport	(m <sup>3</sup> /ha)	(DH/m <sup>3</sup> )	(DH/ha)	Eau
C1	1					
C2	2					
.	,					
.	,					

• **Récolte :**

Cultures	Dates	Main d'œuvre	Type de Main œuvre	
		Nombre	Coût Familiale	Salariale
C1	1			
C2	2			
.	.			
.	.			

**Informations complémentaires :**

- Avez-vous bénéficié d'un accompagnement et d'un suivi après la mise en place du projet ?

.....  
 .....

- L'irrigation localisée est-elle la solution aux problèmes posés par le gravitaire ?

.....  
 .....

- Quelles sont les contraintes confrontées suite à l'introduction du G à G ?

- .....  
.....
- Avez-vous des connaissances en matière de l'exploitation et de la gestion de ce nouveau système ?
- .....  
.....

- L'introduction du G à G va-t-il engendrée un gain de temps ?
- .....  
.....

- Le G à G, va-t-il augmenté ou réduit le nombre de main d'œuvres employée et le NJT?
- .....  
.....

- Y a-t-il un changement au niveau des quantités apportées de fertilisants et produits phytosanitaires?
- .....  
.....

- L'introduction du G à G a-t-il entraîné un changement d'assolement ? et pourquoi ?
- .....  
.....

- Avez-vous ressenti une économie d'eau à l'échelle de la parcelle après introduction du G à G ?

**Enquête : Nappe :**

- Mode d'utilisation de l'eau souterraine :  
Mélangée à l'eau de surface ? Oui  Non
- Informations sur le dispositif de captage  
Type : Gasoil  Gaz  Electrique  solaire

Niveau de la crépine : .....

- Type de dispositif de captage : Puits / forage / Puits-forage
- Profondeur totale
- Niveau statique
- Superficie irriguée par les eaux de nappe :
- Choix du type d'énergie utilisée :
- Quels sont ces avantages et les inconvénients ?
- Remarque concernant le niveau d'eau :  A baissé ces dernières années Si oui de combien :
- Le coût de pompage
- Consommation journalière moyenne :
- Prix unitaire :
- La fréquence d'approvisionnement :
- Différence entre l'eau de la nappe et l'eau du barrage en termes de qualité
- Quantification de l'usage d'eau de la nappe avant et après la reconversion
- Envisage-t-il creuser un forage ?
- Avez-vous réalisé des analyses sur l'eau de la nappe ?

## Liste des exploitations étudiées et leurs identifications

N°	Noms et Prénoms	Sup (ha)	GI	C.P	C.C	PP	Matricule	Antenne	PB
1	DADES MUSTAPHA	3,5	2	30SM40054	9591	33	36214	M4-1	5
2	MKHANTAR KHALIFA	8,3	1	30SM40065	15445	35	36151	M4-1	7
3	ES-SOUSY SAADIA	3,4	1	30SM40066	15461	36	36165	M4-1	7
4	AMMARI LEBDAOUI	12,57	2	30SM40158	15975	52	3653	M4-1	11
5	CHAKORE ABDERRAHMAN	6,9	2	30SM40259	7377	140_141_4	3658	M4-4	14_2
6	CHTAITIF BOUZEKRI	6,2	1	30SM40262	7387	140_141_8	3658	M4-4	14_3
7	LAISSAOUI OURDIA	8,85	1	30SM40263	7436	26_2	362034	M4-1	3
8	KARIM MOHAMED	6,7	2	30SM40265	7509	26_4	362034	M4-1	3
9	ABDOU MOUHAMED	6,75	1	30SM40266	7545	26_3	362034	M4-1	3
10	MEZOURI BOUZEKRI	7,6	1	30SM40267	7451	26_1	362034	M4-1	3
11	HLIA ABDERRAHMENE	8	1	30SM40283	15450	42_1	36155	M4-1	9
12	M KHANTAR ABDELLAH	7,5	2	30SM40285	19910	42_2	36155	M4-1	9
13	HALYO MOHAMED	5,6	1	30SM40320	18904	59_60_2	3652	M4-2	4
14	FATINE EL MOULOUDI	12,6	1	30SM50006	31560	217-218-219	36206	M5-2	29
15	AMMARI LEBDAOUI	4	1	30SM50030	15975	187	3653	M5-1	30
16	DARKAOUI AICHA	6	1	30SM50037	15650	226-227	36294	M5-2	31
17	EL ABID KHALIFA	6,9	2	30SM50074	15735	245-1	36377	M5-2	33
18	ZERROUKI ABDELAZIZ	7	2	30SM50075	31605	245-2	36377B	M5-2	33
19	RIYAH BRAHIM	4,7	1	30SM50128	9035	250	36507	M5-2	35
20	EL ANBRIEL MUSTAPHA	14,1	2	30SM50161	15723	206-207-208-209	36362A	M5-1	36
21	BAHAR SALAH	7,9	2	30SM50205	7369	305-4	3658	M5-4	47
22	HAKKILAHCEN	4,4	1	30SM50211	7385	290-1	3658	M5-3	46
23	TOUIRSSI SALAH	4,5	1	30SM50212	7384	290-2	3658	M5-3	46
24	EL ASSOULI EL BACHIR	7,3	1	30SM50214	7437	300b-2	362034	M5-4	43
25	MAAROUF EL MEHDI	8,53	1	30SM50217	7442	300b-3	362034	M5-4	43
26	MOUSTAGHIT EL KEBIR	5,6	1	30SM50218	7445	300b-1	362034	M5-4	43
27	MSALA SAID	2	2	30SM50223	8100	276-2	36446	M5-3	40
28	COOP. ENNASR	6,7	2	30SM50225	16025	290-6	3658	M5-3	46
29	FIKRI ABDELGHANI	3,8	2	30SM50279	19185	204-1	36358	M5-1	34
30	EL AZHARI MOHAMED	6,3	2	30SM40331	15567	143_1	36230	M4-4	14_3
31	JOUMADY SAGHIR	17	2	30SM40039	15589	139	36246	M4-4	14_1
32	RIDA EL HACHMI	13,5	2	30SM60022	15967	497	36523	M6-3	62

**GI: Groupe d'Irrigant**

**PP: Prise Propriété**

**CP: Code Parcelle**

**PB: Prise Bloc**

**CC: Code Client**

**TABLEUR POUR LE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION DE  
REFERENCE PAR  
LA FORMULE DE PENMAN-MONTEITH AVEC DUREE D'INSOLATION**

Station:  Altitude : **445** mètres  
 Année :  Longitude: **6,31** degrés  
 Latitude : **32,19** degrés

DATE	JJ	Tmax oC	Tmin oC	Tmoy oC	HRmax %	HRmin %	HRmoy %	n Heure	N Heure	Rs MJ/m2	V24h m/s	EToPM mm/j
1-janv	1			0,00			0,00		9,94	4,663	0,00	<b>0,45</b>
2-janv	2			0,00			0,00		9,95	4,677	0,00	<b>0,45</b>
3-janv	3			0,00			0,00		9,95	4,691	0,00	<b>0,45</b>
4-janv	4			0,00			0,00		9,96	4,706	0,00	<b>0,46</b>
5-janv	5			0,00			0,00		9,97	4,723	0,00	<b>0,46</b>
6-janv	6			0,00			0,00		9,99	4,740	0,00	<b>0,46</b>
7-janv	7			0,00			0,00		10,00	4,759	0,00	<b>0,46</b>
8-janv	8			0,00			0,00		10,01	4,778	0,00	<b>0,47</b>
9-janv	9			0,00			0,00		10,02	4,799	0,00	<b>0,47</b>
10-janv	10			0,00			0,00		10,04	4,821	0,00	<b>0,47</b>
11-janv	11			0,00			0,00		10,05	4,843	0,00	<b>0,47</b>
12-janv	12			0,00			0,00		10,07	4,867	0,00	<b>0,48</b>

Belabess K, (2006)

## Calcul du temps de rinçage nécessaire par secteur d'irrigation

Exploitations	T <sub>rr</sub> (mm)	T <sub>re</sub> (mm)	T <sub>rr</sub> -T <sub>re</sub>	%
1	32	20	12	38
2	30	15	15	50
3	30	20	10	33
4	30	15	15	50
5	30	60	-30	-97
6	22	20	2	7
7	38	*	*	*
8	30	30	0	0
9	27	*	*	*
10	29	*	*	*
11	28	60	-32	-116
12	33	20	13	39
13	30	20	10	33
14	28	30	-2	-8
15	32	*	*	*
16	26	30	-4	-15
17	26	20	6	23
18	21	30	-9	-45
19	22	20	2	9
20	22	20	2	10
21	27	20	7	26
22	23	20	3	14
23	27	45	-18	-66
24	30	20	10	33
25	54	60	-6	-11
26	27	45	-18	-66
27	25	20	5	20
28	27	20	7	26
29	33	15	18	54
30	28	20	8	30
31	24	20	4	17
32	30	15	15	50

T<sub>rr</sub> : Temps requis de rinçage du réseau

T<sub>re</sub> : Temps de rinçage réellement effectué par les usagers

\* : le rinçage n'a pas été effectué

## Indicateurs agro-économiques moyens par classe d'exploitation agricole

Classes	EXP	PB	MB	VA	Ve	Outputs	Va	RDT	EUE	Total
		dh/ha	(Dh/ha)	(Dh/ha)	(Dh/m <sup>3</sup> )	/Inputs	m <sup>3</sup> /ha	(Kg/ha)	(Kg/m <sup>3</sup> )	charges
<b>C1</b>	32	45513	24805	30065	1,00	1,20	24856	40952	1,65	20618
	13	35325	21721	26196	1,55	1,36	14009	34238	2,44	30951
	12	39408	25997	31485	2,89	1,83	9009	42267	4,69	16952
	11	43542	28665	34793	3,15	1,86	9110	44034	4,83	9159
	30	35872	24967	28800	2,17	1,88	11520	51852	4,50	35002
	31	59218	39053	45512	3,11	1,94	12551	48338	3,85	20165
	26	46499	31361	37677	3,99	1,96	7862	49345	6,28	7465
<b>Moyenne</b>		<b>43625</b>	<b>28081</b>	<b>33504</b>	<b>2,6</b>	<b>1,7</b>	<b>12703</b>	<b>44432</b>	<b>4,0</b>	<b>20044</b>
<b>C2</b>	25	32986	22436	25879	3,23	2,01	6950	32571	4,69	11492
	10	42369	28077	33944	0,68	2,03	7543	41054	5,44	7909
	28	40444	27900	31188	3,16	2,08	8817	42298	4,80	21329
	24	43658	29657	33579	4,80	2,09	6175	39856	6,45	4660
	22	36290	24075	27675	2,81	2,15	8553	47138	5,51	21364
	2	49312	34136	40361	3,43	2,18	9946	50188	5,05	15979
	15	33597	24175	27525	2,95	2,19	8199	35469	4,33	11052
	4	49620	35023	41248	3,64	2,25	9612	51149	5,32	6055
	14	40839	28569	32658	3,21	2,26	8902	40556	4,56	4437
	17	38323	26600	30050	3,66	2,31	7261	39610	5,46	11151
	21	42891	30550	34713	3,58	2,33	8545	39059	4,57	14245
	16	52541	38242	45242	3,36	2,34	11391	54772	4,81	15604
	7	42890	30107	35507	4,40	2,36	6842	42400	6,20	12433
	19	39609	28913	32813	3,75	2,37	7714	36488	4,73	13166
	8	46544	32938	38825	4,73	2,41	6958	43372	6,23	10956
5	45669	32766	38496	4,90	2,42	6691	41386	6,19	10771	
6	46740	33713	39357	4,82	2,45	6992	46063	6,59	12624	
<b>Moy</b>		<b>42607</b>	<b>29875</b>	<b>34651</b>	<b>3,6</b>	<b>2,3</b>	<b>8064</b>	<b>42555</b>	<b>5,4</b>	<b>12072</b>
<b>C3</b>	18	43272	30126	33569	3,77	2,50	7995	41744	5,22	11698
	29	44602	32601	36985	4,78	2,51	6814	36067	5,29	13012
	23	52376	37454	42920	4,50	2,59	8318	47925	5,76	14470
	9	43978	32564	35953	4,11	2,67	7918	37060	4,68	13909
	20	47539	34731	39131	5,51	2,73	6306	47467	7,53	12041
	27	51854	38630	43630	6,01	2,76	6429	54757	8,52	31936
	1	49618	37507	41557	4,89	3,10	7663	47083	6,14	31156
	3	49042	37716	41683	5,51	3,18	6844	54139	7,91	22748
<b>Moy</b>		<b>47785</b>	<b>35166</b>	<b>39428</b>	<b>4,9</b>	<b>2,8</b>	<b>7286</b>	<b>45780</b>	<b>6,4</b>	<b>18871</b>

**PB** : Produit Brut ; **MB** : Marge Brute ; **VA** : Valeur Ajoutée ; **Ve** : Valorisation eau

**EUE** : Efficience d'Utilisation de l'Eau ; **RDT** : Rendement ; **Va** : Volume apporté



**Indicateurs agro-économiques moyens par spéculation**

<b>Cultures</b>	<b>PB</b>	<b>MB</b>	<b>VA</b>	<b>Val.eau</b>	<b>Outputs/ Inputs</b>	<b>Vol. app</b>	<b>RDT</b>	<b>EUE</b>	<b>Inputs</b>
	<b>(DH/ha)</b>	<b>(DH/ha)</b>	<b>(DH/ha)</b>	<b>(Dh/m<sup>3</sup>)</b>		<b>(m<sup>3</sup>/ha)</b>	<b>(Kg/ha)</b>	<b>(Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>DH/ha</b>
<b>Petit pois</b>	7700	1679	2679	1,44	1,28	5343	6600	1,24	6021
<b>Orge</b>									
<b>fourrage</b>	14509	5305	6669	3,83	0,99	2625	12091	4,92	4540
<b>carottes</b>	18400	10227	13727	3,38	1,22	3065	23167	7,73	8173
<b>Sésame</b>	23034	20150	20243	1,84	3,20	9389	1026	0,12	7110
<b>Fève en vert</b>	29714	24333	25533	3,21	5,01	7856	22857	3,00	5381
<b>Luzerne</b>	32000	21316	27800	1,38	1,90	15455	80000	5,66	10684
<b>Céréales</b>	32601	24362	29451	4,09	3,48	5957	7502	1,32	8239
<b>Olivier</b>	32875	13489	26175	3,01	1,69	4644	6575	1,46	19386
<b>Pomme terre</b>	45000	17003	19003	5,80	0,61	2932	30000	10,23	27997
<b>Mais</b>									13491
<b>fourrage</b>	58400	44909	48409	6,15	3,33	7776	71350	9,56	
<b>Menthe</b>	60000	33918	48918	2,27	1,30	14925	80000	5,36	26082
<b>Oignon</b>	63000	35791	42250	3,60	2,31	10699	69900	6,98	27209
<b>courgette</b>	64363	51733	58233	8,54	5,72	4855	40875	9,50	12629
<b>Betterave</b>	68312	47295	56912	5,85	3,17	8083	87090	11,38	<b>21017</b>
<b>Niora</b>	78000	61551	68451	5,77	3,70	12704	52056	4,83	16491
<b>Melon</b>	90000	71822	73822	9,14	3,95	7859	50000	6,36	18178
<b>Agrumes</b>	120000	76384	89134	5,98	1,75	12780	60000	4,69	43616
<b>Moyenne</b>	<b>49289</b>	<b>33016</b>	<b>38671</b>	<b>4,43</b>	<b>2,62</b>	<b>8056</b>	<b>41240</b>	<b>5,55</b>	<b>16250</b>

**PB** : Produit Brut (DH/ha) ; **MB** : Marge Brute (DH/ha) ; **VA** : Valeur Ajoutée (DH/ha) ; **Ve** : Valorisation eau (DH/m<sup>3</sup>eau) ; **EUE** : Efficience d'Utilisation de l'Eau (kg/m<sup>3</sup>eau) ; **RDT** : Rendement (kg/ha) ; **Va** : Volume apporté (m<sup>3</sup>/ha) ; **O/I** (Output/Input)

**Indices agro-économiques par exploitation en situation post-projet**

EXP	SUP (Ha)	Total charges	Produit brut DH	Marge Brute (DH)	Valeur ajoutée DH
1	3,5	124625	198471	150030	166230
2	8,3	127834	394498	273089	322889
3	3,4	136488	294255	226296	250096
4	12,57	48441	396960	280184	329984
5	6,9	107705	456694	327656	384956
6	6,2	113613	420658	303414	354214
7	8,85	124330	428904	301070	355070
8	6,7	109564	465441	329382	388253
9	6,75	125185	395800	293073	323573
10	7,6	71180	381322	252697	305497
11	8	64110	304794	200652	243552
12	7,5	135619	315261	207977	251877
13	5,6	123805	141298	86883	104783
14	12,6	39930	367553	257124	293924
15	4	44207	134386	96699	110099
16	6	78018	262705	191211	226211
17	6,9	89205	306584	212802	240402
18	7	81884	302906	210882	234982
19	4,7	92161	277264	202389	229689
20	14,1	84290	332776	243117	273917
21	7,9	113958	343131	244402	277702
22	4,4	85455	145161	96298	110698
23	4,5	86817	314255	224722	257522
24	7,3	41938	392918	266914	302214
25	8,53	80441	230905	157053	181153
26	5,6	44788	278991	188164	226064
27	2	95807	155563	115889	130889
28	6,7	127971	242667	167399	187126
29	3,8	78070	267610	195609	221909
30	6,3	105005	107616	74900	86400
31	17	120987	355307	234320	273070
32	13,5	103089	227567	124025	150325
<b>Total</b>	<b>235</b>	<b>3006520</b>	<b>9640222</b>	<b>6736322</b>	<b>7795269</b>

## Humidités volumique par horizons du sol mesurées

### Par la sonde capacitive

Humidité sol (%)						
Date	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
19/10/2016	32,95	33,10	35,64	36,38	36,66	39,54
20/10/2016	32,72	33,00	35,52	36,47	37,08	40,46
21/10/2016	33,00	33,10	35,74	36,51	37,11	40,53
22/10/2016	33,07	33,10	35,74	36,54	37,11	40,59
23/10/2016	32,99	33,00	35,74	36,51	37,14	40,64
24/10/2016	32,98	33,10	35,67	36,51	37,14	40,64
25/10/2016	32,85	33,10	35,64	36,49	37,12	40,64
26/10/2016	32,81	33,10	35,58	36,50	37,14	40,64
27/10/2016	32,67	33,05	35,52	36,48	37,12	40,64
28/10/2016	32,39	33,00	35,49	36,49	37,11	40,64
29/10/2016	32,49	33,00	35,49	36,47	37,11	40,66
30/10/2016	33,10	33,10	35,86	36,55	37,15	40,68
31/10/2016	32,80	33,10	35,79	36,55	37,14	40,66
01/11/2016	32,59	33,00	35,55	36,50	37,14	40,64
02/11/2016	32,30	32,93	35,24	36,48	37,11	40,61
03/11/2016	32,20	32,87	35,09	36,43	37,08	40,64
04/11/2016	32,18	32,85	35,05	36,40	37,07	40,59
05/11/2016	32,13	32,85	35,03	36,39	37,04	40,59
06/11/2016	32,00	32,77	35,03	36,39	37,05	40,59
07/11/2016	31,95	32,66	34,90	36,38	37,04	40,55
08/11/2016	31,77	32,57	34,87	36,37	37,05	40,55
09/11/2016	31,54	32,45	34,78	36,36	37,02	40,53
10/11/2016	31,33	32,32	34,75	36,34	37,02	40,51
11/11/2016	31,12	32,20	34,65	36,33	37,01	40,49
12/11/2016	31,65	32,56	34,99	36,37	37,05	40,55
13/11/2016	31,58	32,46	34,87	36,34	37,02	40,53
14/11/2016	31,56	32,46	34,84	36,32	37,01	40,53
15/11/2016	31,73	32,65	34,99	36,34	37,00	40,55
16/11/2016	32,01	32,77	35,05	36,33	37,00	40,57
17/11/2016	31,84	32,60	34,87	36,29	36,95	40,55
18/11/2016	31,59	32,40	34,68	36,23	36,91	40,51
19/11/2016	31,81	32,57	34,75	36,23	36,88	40,46
20/11/2016	32,12	32,71	34,90	36,25	36,88	40,46
21/11/2016	32,06	32,74	34,93	36,25	36,88	40,46
22/11/2016	31,71	32,52	34,84	36,25	36,87	40,42
23/11/2016	31,78	32,57	34,81	36,23	36,85	40,40
24/11/2016	31,60	32,49	34,75	36,22	36,83	40,38
25/11/2016	31,72	32,56	34,78	36,23	36,83	40,36
26/11/2016	31,98	32,73	34,93	36,25	36,83	40,34

27/11/2016	32,49	33,10	35,33	36,33	36,85	40,36
28/11/2016	32,16	32,94	35,30	36,35	36,90	40,40
29/11/2016	32,27	33,01	35,33	36,35	36,91	40,40
30/11/2016	31,82	32,77	35,24	36,35	36,93	40,40
01/12/2016	31,64	32,62	35,03	36,32	36,90	40,40
02/12/2016	31,58	32,59	34,96	36,30	36,87	40,38
03/12/2016	31,46	32,49	34,84	36,26	36,85	40,36
04/12/2016	31,44	32,43	34,72	36,23	36,84	40,34
05/12/2016	31,33	32,37	34,68	36,22	36,81	40,29
06/12/2016	31,25	32,31	34,56	36,20	36,80	40,27
07/12/2016	31,18	32,24	34,50	36,18	36,77	40,25
08/12/2016	31,90	32,51	34,65	36,18	36,76	40,25
09/12/2016	31,40	32,24	34,50	36,18	36,77	40,23
10/12/2016	31,92	32,54	34,62	36,16	36,78	40,23
11/12/2016	31,57	32,35	34,50	36,14	36,74	40,21
12/12/2016	31,64	32,34	34,41	36,08	36,70	40,16
19/12/2016	31,89	32,37	34,31	36,08	36,69	40,16
20/12/2016	31,66	32,40	34,37	36,23	36,83	40,10
21/12/2016	31,52	32,21	34,19	36,21	36,80	40,06
22/12/2016	31,46	32,15	34,10	36,18	36,77	40,03
23/12/2016	31,45	32,15	34,07	36,17	36,74	39,99
24/12/2016	31,39	32,12	34,07	36,17	36,74	39,97
25/12/2016	31,31	32,07	34,04	36,17	36,73	39,95
26/12/2016	31,26	32,04	33,98	36,15	36,71	39,95
27/12/2016	31,28	32,12	34,04	36,15	36,70	39,93
28/12/2016	31,09	31,97	33,98	36,15	36,70	39,91
29/12/2016	31,09	31,90	33,91	36,13	36,69	39,91
30/12/2016	31,01	31,84	33,85	36,13	36,67	39,88
31/12/2016	30,91	31,75	33,76	36,10	36,66	39,86
01/01/2017	30,80	31,67	33,70	36,08	36,66	39,84
02/01/2017	30,68	31,53	33,57	36,06	36,63	39,82
03/01/2017	30,56	31,42	33,51	36,04	36,62	39,80
04/01/2017	30,43	31,31	33,39	36,03	36,60	39,78
05/01/2017	30,31	31,25	33,36	36,03	36,59	39,75
06/01/2017	30,19	31,16	33,36	36,03	36,59	39,75
07/01/2017	30,03	31,06	33,27	36,02	36,59	39,73
08/01/2017	29,84	30,93	33,17	36,01	36,59	39,71
09/01/2017	29,74	30,75	33,02	35,99	36,57	39,71
10/01/2017	29,51	30,74	32,99	35,99	36,57	39,71
11/01/2017	29,46	30,55	32,80	35,97	36,56	39,67
12/01/2017	29,28	30,44	32,71	35,96	36,56	39,67
13/01/2017	29,12	30,38	32,58	35,96	36,55	39,65
14/01/2017	28,88	30,30	32,49	35,96	36,55	39,65
15/01/2017	28,79	30,12	32,31	35,92	36,55	39,62
16/01/2017	28,58	29,92	32,12	35,91	36,53	39,60
17/01/2017	28,40	29,78	31,90	35,86	36,50	39,58
18/01/2017	28,14	29,65	31,78	35,83	36,49	39,58

19/01/2017	30,17	29,89	31,90	35,82	36,48	39,58
20/01/2017	30,52	30,69	32,46	35,83	36,45	39,58
21/01/2017	30,40	30,72	32,55	35,86	36,42	39,54
22/01/2017	30,53	30,78	32,68	35,90	36,43	39,52
23/01/2017	30,52	30,93	32,77	35,93	36,45	39,52
24/01/2017	30,61	30,93	32,89	35,95	36,48	39,49
25/01/2017	30,16	30,72	32,64	35,94	36,49	39,49
26/01/2017	30,17	30,77	32,64	35,93	36,49	39,52
27/01/2017	30,89	31,17	32,92	35,97	36,49	39,49
28/01/2017	30,73	31,23	33,14	36,03	36,53	39,52
29/01/2017	30,37	31,03	33,05	36,04	36,57	39,54
30/01/2017	30,21	30,97	33,02	36,04	36,59	39,56
31/01/2017	30,19	31,02	33,05	36,06	36,60	39,56
01/02/2017	30,28	31,20	33,20	36,08	36,60	39,58
02/02/2017	29,95	31,02	33,14	36,12	36,64	39,60
03/02/2017	30,02	31,02	33,08	36,12	36,64	39,62
04/02/2017	29,77	30,94	33,08	36,12	36,66	39,62
05/02/2017	29,73	30,93	33,02	36,11	36,66	39,62
06/02/2017	29,50	30,86	33,02	36,12	36,67	39,65
07/02/2017	29,26	30,82	32,95	36,12	36,67	39,65
08/02/2017	29,15	30,82	32,99	36,12	36,69	39,65
09/02/2017	28,91	30,71	32,92	36,12	36,67	39,65
10/02/2017	29,07	30,91	33,02	36,12	36,69	39,65
11/02/2017	30,37	30,88	32,92	36,12	36,67	39,69
12/02/2017	30,54	31,19	33,05	36,12	36,66	39,67
13/02/2017	30,76	31,34	33,30	36,18	36,69	39,69
14/02/2017	30,32	31,17	33,17	36,17	36,70	39,71
15/02/2017	30,04	31,10	33,11	36,15	36,69	39,71
16/02/2017	29,92	31,11	33,14	36,17	36,69	39,71
17/02/2017	29,77	31,03	33,14	36,17	36,69	39,69
18/02/2017	29,56	30,94	33,05	36,16	36,69	39,69
19/02/2017	29,68	31,03	33,08	36,16	36,67	39,69
20/02/2017	30,56	30,96	32,95	36,14	36,66	39,71
21/02/2017	30,24	30,94	32,89	36,11	36,63	39,71
22/02/2017	30,13	30,85	32,77	36,08	36,62	39,67
23/02/2017	31,13	31,31	32,95	36,08	36,57	39,67
24/02/2017	31,60	32,12	34,37	36,25	36,57	39,65
25/02/2017	31,17	31,95	34,25	36,29	36,78	39,75
26/02/2017	31,12	31,95	34,19	36,29	36,77	39,78
27/02/2017	30,97	31,97	34,19	36,31	36,78	39,80
01/03/2017	31,01	31,66	33,88	36,29	36,78	39,84
02/03/2017	31,00	31,58	33,82	36,29	36,78	39,82
03/03/2017	30,65	31,53	33,88	36,30	36,80	39,82
04/03/2017	30,64	31,42	33,67	36,25	36,77	39,82
05/03/2017	30,65	31,45	33,70	36,25	36,77	39,82
06/03/2017	30,34	31,25	33,67	36,26	36,78	39,80
07/03/2017	30,14	31,14	33,70	36,29	36,78	39,82

08/03/2017	29,68	30,77	33,57	36,29	36,81	39,84
09/03/2017	29,09	30,24	33,48	36,29	36,83	39,84
10/03/2017	28,48	29,48	33,23	36,24	36,84	39,84
11/03/2017	28,06	29,06	33,57	36,24	36,90	39,88
12/03/2017	28,14	30,05	34,31	36,37	37,00	40,01
13/03/2017	28,17	30,05	34,07	36,35	36,98	39,99
14/03/2017	28,05	29,68	33,57	36,24	36,94	39,99
15/03/2017	27,88	29,40	33,36	36,20	36,90	39,97
16/03/2017	27,65	29,29	33,30	36,18	36,87	39,91
17/03/2017	27,47	29,08	33,14	36,15	36,85	39,91
18/03/2017	27,22	28,70	32,92	36,13	36,84	39,88
19/03/2017	26,80	27,91	32,55	36,08	36,83	39,86
20/03/2017	26,35	27,14	31,87	35,99	36,81	39,86
21/03/2017	25,99	26,50	31,13	35,85	36,73	39,84
22/03/2017	26,60	28,38	33,39	36,08	36,83	39,88
23/03/2017	26,70	28,36	33,17	36,06	36,81	39,86
24/03/2017	28,20	28,18	32,83	36,00	36,78	39,86
25/03/2017	28,11	27,82	32,46	35,93	36,73	39,84
26/03/2017	27,78	27,46	32,09	35,86	36,69	39,80
27/03/2017	27,49	27,06	31,66	35,80	36,64	39,75
28/03/2017	28,23	28,83	33,45	36,10	36,80	39,84
29/03/2017	28,17	28,67	33,20	36,06	36,77	39,84
30/03/2017	28,01	28,56	33,36	36,04	36,76	39,82
31/03/2017	28,52	29,23	33,76	36,20	36,85	39,91
01/04/2017	28,30	28,94	33,48	36,17	36,85	39,88
02/04/2017	27,94	29,05	34,78	36,24	36,85	39,88
03/04/2017	28,67	29,59	33,98	36,26	36,94	39,97
04/04/2017	28,51	29,37	33,67	36,23	36,91	39,97
05/04/2017	27,91	28,86	33,36	36,17	36,90	39,95
06/04/2017	27,14	28,08	32,99	36,12	36,88	39,95
07/04/2017	26,38	27,26	32,49	36,03	36,84	39,93
08/04/2017	26,86	30,09	35,24	36,37	36,80	39,91
09/04/2017	27,42	29,34	33,73	36,19	36,88	39,95
10/04/2017	26,67	28,56	33,30	36,12	36,87	39,93
11/04/2017	25,94	27,51	32,80	36,02	36,83	39,84
12/04/2017	27,52	29,64	33,91	36,25	36,95	39,86
13/04/2017	27,13	29,19	33,57	36,20	36,94	39,88
14/04/2017	26,55	28,75	33,27	36,13	36,91	39,84
15/04/2017	25,90	27,83	32,86	36,04	36,84	39,75
16/04/2017	25,50	27,06	32,25	35,90	36,69	39,62
17/04/2017	24,94	26,22	31,35	35,58	36,38	39,41
18/04/2017	26,86	29,48	33,57	35,94	36,24	39,22
19/04/2017	26,32	28,94	33,02	35,76	36,14	39,02
20/04/2017	25,61	27,99	32,40	35,63	36,00	38,85
21/04/2017	26,78	29,46	33,32	35,65	35,81	38,66
22/04/2017	26,86	29,25	32,99	35,60	35,77	38,55
23/04/2017	26,46	28,66	32,61	35,45	35,60	38,40

24/04/2017	27,18	27,94	32,18	35,30	35,41	38,25
25/04/2017	26,75	27,40	31,63	35,20	35,27	38,10
26/04/2017	26,00	26,69	30,76	35,00	35,07	37,92
27/04/2017	25,05	25,80	29,50	34,70	34,84	37,67
28/04/2017	24,73	25,36	28,23	34,73	34,60	37,49
29/04/2017	27,87	29,01	32,21	34,50	34,45	37,36
30/04/2017	28,31	29,20	32,37	34,30	34,35	37,24
01/05/2017	28,04	29,06	32,03	34,25	34,31	37,13
02/05/2017	27,71	28,91	31,75	34,20	34,25	36,98
03/05/2017	27,02	28,47	31,41	34,10	34,17	36,87
04/05/2017	26,36	28,47	31,07	34,00	34,08	36,76
05/05/2017	27,08	29,03	32,06	34,25	34,39	36,72
06/05/2017	26,93	28,63	31,57	34,30	34,41	36,65
07/05/2017	26,18	27,74	30,88	34,28	34,36	36,55
08/05/2017	25,20	26,47	29,68	34,20	34,28	36,44
09/05/2017	24,11	24,93	28,04	34,10	34,18	36,31
10/05/2017	23,12	23,32	26,13	34,05	34,08	36,18
11/05/2017	24,73	27,34	30,55	34,10	34,19	36,12
12/05/2017	24,75	27,21	30,08	34,00	34,17	36,03
13/05/2017	24,36	26,42	29,25	34,00	34,11	35,96
14/05/2017	23,64	25,09	28,32	33,90	34,04	35,86
15/05/2017	24,18	26,27	30,14	33,80	33,97	35,70
16/05/2017	24,16	26,13	29,90	33,75	33,89	35,60
17/05/2017	24,00	26,23	29,56	33,60	33,79	35,45
18/05/2017	23,77	26,17	29,12	33,60	33,63	35,32
19/05/2017	23,78	26,27	29,22	33,40	33,45	35,17
20/05/2017	23,58	25,74	28,26	33,20	33,28	35,02
21/05/2017	22,86	24,03	26,38	33,00	33,13	34,80
22/05/2017	22,80	24,50	26,19	32,80	32,96	34,57
23/05/2017	22,65	23,41	25,05	32,65	32,84	34,33
24/05/2017	23,04	24,51	25,29	32,44	32,67	34,11
25/05/2017	22,99	23,73	24,74	32,32	32,57	33,98
26/05/2017	23,16	23,94	24,74	32,19	32,45	33,79
27/05/2017	22,72	22,85	23,57	32,06	32,35	33,64
28/05/2017	22,11	22,40	22,50	31,81	32,27	33,47
29/05/2017	22,20	22,50	22,55	31,62	32,20	33,34
30/05/2017	22,15	22,40	22,60	31,43	32,08	33,23
31/05/2017	21,64	21,75	21,85	31,26	31,98	33,10
01/06/2017	21,13	21,30	21,34	31,12	31,89	32,95
02/06/2017	21,17	21,42	21,65	31,03	31,82	34,04
03/06/2017	20,82	21,40	21,60	30,98	31,77	34,55
04/06/2017	20,90	21,30	21,40	30,92	31,73	36,37
05/06/2017	21,47	22,50	22,65	31,23	31,67	36,28
06/06/2017	24,24	25,38	28,35	34,80	34,94	36,77
07/06/2017	24,02	25,18	27,70	34,75	34,91	36,37
08/06/2017	23,51	24,57	26,96	34,70	34,76	36,36
09/06/2017	24,24	25,91	28,60	34,90	35,01	38,50

10/06/2017	24,19	25,94	28,29	34,95	35,00	38,04
11/06/2017	23,51	25,26	27,58	34,70	34,88	38,18
12/06/2017	22,95	25,18	26,68	34,60	34,74	38,50
13/06/2017	25,38	27,97	30,42	35,90	36,01	38,72
14/06/2017	26,33	29,15	31,47	36,12	36,32	39,43
15/06/2017	26,03	28,95	31,07	36,03	36,22	39,17
16/06/2017	26,38	29,31	31,47	36,11	36,24	39,00
17/06/2017	25,81	29,71	31,81	36,08	36,21	38,89
18/06/2017	27,14	30,01	32,31	36,34	36,56	39,78
19/06/2017	27,30	29,89	31,97	36,25	36,48	39,58
20/06/2017	26,43	29,70	31,78	36,22	36,40	39,45
21/06/2017	25,40	29,46	31,59	36,18	36,39	39,39
22/06/2017	24,11	28,88	31,35	36,16	36,35	39,26
23/06/2017	22,98	27,85	31,01	36,11	36,31	39,17
24/06/2017	22,11	26,62	30,45	36,05	36,26	39,02
25/06/2017	21,51	25,51	29,81	36,00	36,21	38,87
26/06/2017	21,24	24,28	28,69	35,92	36,15	38,70
27/06/2017	20,93	23,36	27,58	35,84	36,11	38,57



**Température mesurée**  
**Par la sonde capacitive par horizons du sol**

Date	Température (°C)					
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
19/10/16	19,6	21,6	22,2	23,6	25	25,2
20/10/2016	20	21	22,2	23,4	24,4	25
21/10/2016	19,4	21,6	21,6	23,2	24,4	25
22/10/2016	19,2	21	22,2	23,4	24,4	24,6
23/10/2016	18,4	20,2	21,6	23,2	24,2	24,4
24/10/2016	19,2	20,2	21,6	23	24	24,2
25/10/2016	18,6	20,4	21,6	23	24	24,2
26/10/2016	18,2	20	21,2	22,6	23,6	24,2
27/10/2016	19,4	20,4	21,6	23	23,6	24
28/10/2016	18,4	20,2	21,4	22,6	23,6	24
29/10/2016	19	19,6	20,6	22,2	23,4	23,6
30/10/2016	19	20,2	21,2	22,2	23,2	23,6
31/10/2016	16,6	19	20,4	21,6	23	23,2
01/11/2016	15,6	17,4	19,4	21	22,4	23,2
02/11/2016	12	15,2	18,2	20,2	22,2	23
03/11/2016	12	15,2	17,6	19,6	21,6	22,4
04/11/2016	19	15,4	17,6	19,4	21,2	22,2
05/11/2016	19,2	16	18	19,4	21,2	22
06/11/2016	14	15,6	18	19,4	21	21,6
07/11/2016	14	15,4	17,6	19,4	21	21,6
08/11/2016	15	15,4	17,6	19,2	20,6	21,4
09/11/2016	15	15,2	17,4	19,2	20,6	21,4
10/11/2016	15	15	17,4	19	20,4	21,2
11/11/2016	14	14,6	17,2	19	20,4	21,2
12/11/2016	14	14,6	17	18,6	20,2	21
13/11/2016	14	14,2	16,6	18,4	20	21
14/11/2016	14,2	14,4	16,6	18,2	19,6	20,6
15/11/2016	16,1	16,4	17,4	18,4	19,6	20,4
16/11/2016	14,1	14,4	16,2	18	19,4	20,4
17/11/2016	13	13,4	15,4	17,2	19,2	20,2
18/11/2016	12	12,2	14,6	16,6	18,6	20
19/11/2016	13,5	14	15,2	16,6	18,4	19,4
20/11/2016	14	14,4	15,4	17	18,4	19,4
21/11/2016	14	14,2	15,4	16,6	18,2	19,2
22/11/2016	12,6	13	15,2	16,6	18,2	19,2
23/11/2016	13	13,6	15,2	16,6	18	19
24/11/2016	12,8	13,2	15,2	16,6	18	19
25/11/2016	14	14,2	15,4	16,6	18	18,6
26/11/2016	14,8	15,2	16	17	18	18,6
27/11/2016	16	16,6	17	17,6	18,2	18,6

28/11/2016	15,35	16,2	17	18	18,4	19
29/11/2016	16	16,6	17	17,6	18,4	19
30/11/2016	14,9	15,2	17	18	18,6	19
01/12/2016	13,8	14,2	16,2	17,6	18,6	19
02/12/2016	14	14,2	16	17,4	18,4	19
03/12/2016	13,1	13,6	15,6	17,2	18,2	19
04/12/2016	13	13,4	15,2	16,6	18	18,6
05/12/2016	13	13,2	15,2	16,6	18	18,6
06/12/2016	12,5	13	15	16,4	17,6	18,4
07/12/2016	12	12,6	14,6	16,2	17,4	18,4
08/12/2016	14	15	15,4	16,2	17,4	18,2
09/12/2016	12,1	12,6	14,6	16,2	17,4	18,2
10/12/2016	11,2	12	13,6	15,2	17,2	18
11/12/2016	10,8	11,2	13,4	15	16,6	17,6
12/12/2016	10,8	11,4	13	14,6	16,4	17,4
19/12/2016	11	11,4	12,6	14,4	16,2	17,4
20/12/2016	12	12,2	13,2	14,4	16,2	17,2
21/12/2016	10,5	11	12,4	14,4	16,2	17,2
22/12/2016	10	10,6	12,2	14,2	16	17
23/12/2016	10	10,6	12,2	14	15,6	17
24/12/2016	10	10,6	12,4	14,2	15,6	16,6
25/12/2016	10,1	10,6	12,2	14	15,6	16,6
26/12/2016	10,2	10,6	12,2	14	15,6	16,4
27/12/2016	11	11,4	12,6	14	15,4	16,4
28/12/2016	10	10,4	12,4	14	15,4	16,4
29/12/2016	10	10,2	12,2	14	15,4	16,4
30/12/2016	9,9	10,2	12	13,6	15,4	16,2
31/12/2016	9,5	10	12	13,6	15,2	16,2
01/01/2017	9,2	9,6	11,6	13,4	15,2	16,2
02/01/2017	8,7	9,2	11,4	13,4	15	16
03/01/2017	8,7	9,2	11,4	13,2	15	16
04/01/2017	8,7	9,2	11,4	13,2	15	15,6
05/01/2017	9,1	9,6	11,6	13,2	14,6	15,6
06/01/2017	9,5	10	12	13,4	14,6	15,6
07/01/2017	9,7	10,2	12	13,4	14,6	15,6
08/01/2017	9,5	10	12	13,4	15	15,6
09/01/2017	8,9	9,4	11,6	13,4	14,6	15,4
10/01/2017	9,7	10,2	11,6	13,4	14,6	15,4
11/01/2017	8,9	9,4	11,6	13,2	14,6	15,4
12/01/2017	8,9	9,4	11,6	13,2	14,6	15,4
13/01/2017	9,5	10	12	13,4	14,6	15,4
14/01/2017	9,7	10,2	12	13,4	14,6	15,4
15/01/2017	9,1	9,6	11,6	13,2	14,4	15,2
16/01/2017	8,5	9	11,4	13,2	14,4	15,2
17/01/2017	8,5	9	11,2	13	14,4	15,2
18/01/2017	8,5	9	11,2	12,6	14,2	15,2
19/01/2017	10,5	11	11,6	13	14,2	15

20/01/2017	8,5	9	10,4	12,2	14	15
21/01/2017	9,1	9,6	11	12,2	13,6	14,6
22/01/2017	8,1	8,6	10,4	12,2	13,6	14,6
23/01/2017	9,7	10,2	11,2	12,2	13,6	14,4
24/01/2017	8,9	9,4	11	12,4	13,6	14,4
25/01/2017	7,7	8,2	10,4	12,2	13,6	14,4
26/01/2017	8,1	8,6	10,6	12,2	13,4	14,4
27/01/2017	11,1	11,6	12	12,6	13,4	14,2
28/01/2017	11,1	11,6	12,6	13,2	14	14,4
29/01/2017	10,1	10,6	12,4	13,4	14,2	14,4
30/01/2017	9,9	10,4	12,2	13,4	14,2	14,6
31/01/2017	10,5	11	12,6	13,6	14,4	14,6
01/02/2017	12,5	13	13,4	14	14,4	14,6
02/02/2017	11,5	12	13,4	14,4	14,6	15
03/02/2017	11,5	12	13,2	14,2	15	15,2
04/02/2017	11,1	11,6	13,4	14,4	15	15,2
05/02/2017	11,5	12	13,4	14,4	15	15,2
06/02/2017	11,1	11,6	13,4	14,4	15,2	15,2
07/02/2017	11,1	11,6	13,4	14,6	15,2	15,4
08/02/2017	11,7	12,2	13,6	14,6	15,2	15,4
09/02/2017	11,1	11,6	13,6	14,6	15,2	15,4
10/02/2017	13,1	13,6	14,2	15	15,4	15,4
11/02/2017	11,7	12,2	14	15	15,4	15,6
12/02/2017	13,5	14	14,2	15	15,4	15,6
13/02/2017	13,7	14,2	15	15,6	15,6	15,6
14/02/2017	12,5	13	14,4	15,4	15,6	16
15/02/2017	12,1	12,6	14,4	15,4	15,6	16
16/02/2017	12,7	13,2	14,6	15,4	16	16
17/02/2017	12,7	13,2	14,6	15,6	16	16
18/02/2017	12,7	13,2	14,6	15,6	16	16
19/02/2017	13,9	14,4	15	15,6	16	16,2
20/02/2017	12,9	13,4	14,4	15,4	16	16,2
21/02/2017	12,7	13,2	14,4	15,2	16	16,2
22/02/2017	12,1	12,6	14	15	16	16,2
23/02/2017	13,1	13,6	14,4	15,2	15,6	16
24/02/2017	13,5	14	14,4	15,2	15,6	16
25/02/2017	12,7	13,2	14,2	15,2	15,6	16
26/02/2017	13,7	14,2	14,6	15,4	15,6	16
27/02/2017	14,7	15,2	15,2	15,6	16	16
01/03/2017	13,5	14	14,6	15,6	16,2	16,2
02/03/2017	13,7	14,2	14,6	16	16,2	16,4
03/03/2017	14,1	14,6	15,2	16,2	16,4	16,4
04/03/2017	13,7	14,2	14,6	15,6	16,2	16,4
05/03/2017	14,5	15	15,2	15,6	16,2	16,4
06/03/2017	14,1	14,6	15,4	16,2	16,4	16,4
07/03/2017	15,1	15,6	16	16,4	16,6	16,4
08/03/2017	15,1	15,6	16,2	17	17	16,6

09/03/2017	15,5	16	16,6	17,2	17,2	17
10/03/2017	15,9	16,4	17	17,6	17,4	17
11/03/2017	15,7	16,2	17	17,6	17,6	17,2
12/03/2017	15,7	16,2	17	18	18	17,4
13/03/2017	15,7	16,2	17	17,6	18	17,4
14/03/2017	13,1	13,6	15,4	16,6	17,4	17,4
15/03/2017	12,9	13,4	15	16,4	17,2	17,4
16/03/2017	14,5	15	15,4	16,4	17	17,2
17/03/2017	14,1	14,6	15,4	16,4	17	17,2
18/03/2017	14,1	14,6	15,6	16,4	17	17,2
19/03/2017	14,7	15,2	16	16,6	17,2	17,2
20/03/2017	14,5	15	15,6	16,6	17,2	17,2
21/03/2017	14,9	15,4	16	17	17,2	17,2
22/03/2017	14,1	14,6	15,6	16,6	17,2	17,2
23/03/2017	15,1	15,6	16,2	16,6	17,2	17,2
24/03/2017	13,5	14	15	16,2	17	17,2
25/03/2017	12,5	13	14,4	16	17	17
26/03/2017	12,5	13	14,4	15,6	16,6	17
27/03/2017	12,9	13,4	14,4	15,6	16,4	16,6
28/03/2017	13,5	14	15	16	16,4	16,6
29/03/2017	13,7	14,2	15,2	16,2	16,6	16,6
30/03/2017	14,5	15	15,6	16,4	16,6	16,6
31/03/2017	15,5	16	16,4	17	17	17
01/04/2017	15,5	16	16,6	17,2	17,2	17
02/04/2017	15,5	16	16,6	17,2	17,4	17,2
03/04/2017	15,7	16,2	17	17,4	17,4	17,2
04/04/2017	15,9	16,4	17	17,6	17,6	17,4
05/04/2017	15,9	16,4	17,2	17,6	17,6	17,4
06/04/2017	16,1	16,6	17,2	18	18	17,6
07/04/2017	16,5	17	17,6	18,2	18,2	17,6
08/04/2017	17,1	17,6	18,2	18,6	18,2	18
09/04/2017	17,1	17,6	18,4	19	18,4	18
10/04/2017	17,7	18,2	18,6	19,2	18,6	18,2
11/04/2017	17,9	18,4	18,6	19,2	19	18,2
12/04/2017	18,5	19	19,2	19,6	19,2	18,4
13/04/2017	18,5	19	19,2	19,6	19,2	18,6
14/04/2017	18,1	18,6	19,2	19,6	19,2	18,6
15/04/2017	18,5	19	19,4	20	19,4	19
16/04/2017	18,9	19,4	19,6	20	19,4	19
17/04/2017	18,9	19,4	20	20,2	19,6	19,2
18/04/2017	19,7	20,2	20,2	20,4	20	19,2
19/04/2017	19,1	19,6	20,2	20,4	20	19,4
20/04/2017	19,1	19,6	20,2	20,4	20,2	19,4
21/04/2017	19,7	20,2	20,4	20,6	20,2	19,4
22/04/2017	18,9	19,4	19,6	20,2	20,2	19,6
23/04/2017	18,9	19,4	20	20,4	20,2	19,6
24/04/2017	19,5	20	20,2	20,4	20,2	19,6

25/04/2017	19,1	19,6	20,2	20,4	20,2	19,6
26/04/2017	18,7	19,2	20	20,4	20,2	19,6
27/04/2017	18,7	19,2	20	20,4	20,2	19,6
28/04/2017	19,7	20,2	20,4	20,6	20,4	20
29/04/2017	19,5	20	20,4	21	20,4	20
30/04/2017	18,9	19,4	20,2	20,6	20,4	20
01/05/2017	18,5	19	19,6	20,4	20,4	20
02/05/2017	18,7	19,2	20	20,4	20,4	20
03/05/2017	19,9	20,4	20,6	21	20,4	20
04/05/2017	20,1	20,6	21	21,2	20,6	20,2
05/05/2017	19,9	20,4	20,6	21,2	21	20,2
06/05/2017	19,9	20,4	20,6	21	21	20,2
07/05/2017	19,7	20,2	20,6	21,2	21	20,4
08/05/2017	19,9	20,4	21	21,4	21	20,4
09/05/2017	20,5	21	21,2	21,4	21,2	20,4
10/05/2017	19,9	20,4	21,2	21,4	21,2	20,4
11/05/2017	20,7	21,2	21,4	21,6	21,2	20,6
12/05/2017	20,7	21,2	21,4	21,6	21,4	20,6
13/05/2017	20,5	21	21,2	21,6	21,4	20,6
14/05/2017	19,9	20,4	21	21,6	21,4	20,6
15/05/2017	20,5	21	21,4	22	21,4	21
16/05/2017	21,1	21,6	22	22,2	21,6	21
17/05/2017	21,7	22,2	22,4	22,6	22	21
18/05/2017	21,9	22,4	22,6	23	22	21,2
19/05/2017	21,5	22	22,4	23	22,2	21,4
20/05/2017	21,9	22,4	23	23	22,2	21,4
21/05/2017	22,5	23	23,2	23,2	22,4	21,6
22/05/2017	22,5	23	23,2	23,4	22,6	21,6
23/05/2017	21,9	22,4	23	23,2	22,6	22
24/05/2017	22,1	22,6	23,2	23,4	22,6	22
25/05/2017	21,7	22,2	22,4	23	22,6	22
26/05/2017	21,7	22,2	22	22,6	22,4	22
27/05/2017	21,9	22,4	22	22,4	22,4	22
28/05/2017	22,5	23	22,6	23	22,4	22
29/05/2017	22,1	22,6	22,2	22,6	22,4	22
30/05/2017	21,7	22,2	22	22,6	22,4	22
31/05/2017	22,9	23,4	22,6	23	22,6	22
01/06/2017	23,7	24,2	23,2	23,4	23	22
02/06/2017	23,7	24,2	23,6	24	23,2	22,2
03/06/2017	24,5	25	24	24,2	23,4	22,4
04/06/2017	24,5	25	24,2	24,4	23,4	22,4
05/06/2017	23,1	23,6	23,6	24,2	23,6	22,6
06/06/2017	23,1	23,6	23,6	24,4	24	23
07/06/2017	23,5	24	23,6	24,2	23,6	23
08/06/2017	24,5	25	24,4	24,6	24	23
09/06/2017	24,5	25	24,6	25	24,2	23,2
10/06/2017	24,5	25	24,6	25	24,2	23,2

11/06/2017	25,5	26	25,2	25,4	24,4	23,4
12/06/2017	25,7	26,2	25,6	25,6	24,6	23,4
13/06/2017	24,9	25,4	26	26,2	25,2	24
14/06/2017	24,7	25,2	25,2	25,6	25,2	24
15/06/2017	24,9	25,4	25,4	25,6	25	24
16/06/2017	24,7	25,2	25,2	25,6	25,2	24,2
17/06/2017	25,9	26,4	26,2	26,2	25,2	24,2
18/06/2017	26,1	26,6	26,4	26,6	25,6	24,4
19/06/2017	25,5	26	26,2	26,6	25,6	24,4
20/06/2017	25,9	26,4	26,4	26,6	26	24,6
21/06/2017	25,9	26,4	26,6	27	26	24,6
22/06/2017	25,9	26,4	26,6	27	26,2	25
23/06/2017	25,7	26,2	26,4	27	26,2	25
24/06/2017	25,9	26,4	27	27,2	26,2	25,2
25/06/2017	27,5	28	27,6	27,6	26,4	25,2
26/06/2017	27,1	27,6	27,6	28	26,6	25,4
27/06/2017	27,1	27,6	28	28	27	25,4
28/06/2017	29,9	30,4	30	30,2	30,2	30,2