

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli  
Mascara



جامعة مصطفى أسطمبولي  
معسكر

**Faculté** : Sciences de la Nature et de la Vie

**Département** : Agronomie

Laboratoire de Recherche en Géomatique, Ecologie et Environnement (LGéo2E)

## THESE de DOCTORAT

Spécialité : Sciences de l'eau et de l'environnement

Option : Hydrogéologie, Sol et Environnement

*Thème :*

**Contribution à la mise en œuvre d'un modèle conceptuel  
pour la gestion intégrée des ressources en eau en Algérie :  
cas du bassin versant de la Macta dans l'ouest algérien**

*Présentée par :* TAZEKRIT Idir

Le 13 / 06 / 2019

**Devant le jury :**

Président	BENARICHA Boumediene	MCA	Université de Mascara
Examineur	ABABOU Adda	MCA	Université de Chleff
Examineur	BENKHLIFA Mohamed	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	ELOUISSI Abdelkader	MCA	Université de Mascara
Directeur de thèse	BENSLIMANE Mohamed	MCA	Université de Mascara

Année Universitaire : 2018-2019

## *Remerciements*

Je remercie Dieu avant tout, de m'avoir tout accordé pour mener ce travail au mieux.

Mes premiers remerciements s'adressent tout naturellement à mon directeur de thèse M. BENSLIMANE Mohamed, MCA à l'université Mustapha Stambouli. Je tiens à lui exprimer ma vive reconnaissance pour ses enseignements, pour ses encouragements et pour la confiance qu'il m'a accordée.

Je tiens à remercier très chaleureusement Dr. BENARICHA Boumediene de m'avoir honoré par la présidence de ce jury.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail, en l'occurrence, le Professeur BENKHLIFA Mohamed de l'université de Mostaganem, le Dr. ABABOU Adda de l'université de Chleff et le Dr. ELOUISSI Abdelkader de l'université de Mascara.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe du projet PHC Maghreb 2014 intitulé « estimation de la consommation de l'eau en agriculture pluviale », particulièrement Dr. HAMIMED Abderrahmane, Dr. SIMONNEAUX Vincent et Dr. LEDANTEC Valérie.

Sans oublier l'équipe du laboratoire LMI-TREMA de l'université de Marrakech, les Pr. ER-RAKI Salah et KHABA Said, et l'ensemble des doctorants que j'ai pu rencontrer au stage de Marrakech, en particulier M. DIARRA Alhousseine.

Ma pensée va aux personnes rencontrées lors du stage de Toulouse, notamment LE-PAGE Michel.

Egalement le Pr. HARTANI Tarik pour son soutien, le Pr. KHALDI Abdelkader pour son aide précieux, ainsi que le Pr. KUPER Marcel.

Mes remerciements s'adressent également à tout le personnel de l'université de Mascara pour leur soutien moral et logistique.

TAZEKRIT Idir

# SOMMAIRE

Résumé	10
Abstract	11
ملخص	12
<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
1.1 Préambule	14
1.2 Structuration de la thèse	14
1.3 Aperçu climatique de la Macta	18
<b>Chapitre 1 : La gestion de l'offre–demande en eau</b>	<b>24</b>
1.1 La transition de la gestion de l'offre à la gestion de la demande	25
1.2 Le contexte national de la gestion des ressources en eau	25
1.2.1 La politique de l'eau en Algérie	27
1.2.2 Intégration des principes de la GIRE dans la politique nationale	28
1.2.3 Transfert de savoir-faire et gestion déléguée des services publics	29
1.3 Potentialités hydriques de l'Algérie en quelques chiffres	29
1.3.1 Eaux conventionnelles	29
1.3.2 Eaux non conventionnelles / Epuration des eaux usées	31
1.4 L'eau du secteur agricole, Vers une rationalisation de l'usage de l'eau agricole	32
<b>Chapitre 2 : Besoins en eau des cultures</b>	<b>34</b>
2.1 Introduction	35
2.2 Définition et modélisation	35
2.3 Le modelé FAO 56	38
2.3.1 L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ )	39
2.3.2 Le coefficient cultural ( $K_c$ )	40
2.3.2.1 Approche à coefficient cultural simple	41
2.3.2.2 Approche à coefficient cultural double	42
2.3.2.2.1 Coefficient cultural de base, $K_{cb}$	42
2.3.2.2.1 Coefficient d'évaporation du sol, $K_e$	42
2.3.3 Le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ )	44
2.4 Relation $K_{cb}$ -NDVI et $F_c$ -NDVI	46
2.5 Cas des agrumes	46
2.5.1 Importance des agrumes	46
2.5.2 Cycle végétatif et productif des agrumes	47
2.6 Apport de la télédétection spatiale dans l'estimation des besoins en eau des cultures	48
<b>Chapitre 3 : Utilisation conjonctive des ressources en eau souterraine et non conventionnelle dans un système d'irrigation cogéré</b>	<b>50</b>
3.1 Introduction	51

3.2 Aperçu sur la gestion de l'eau communautaire	53
3.2.1 La capacité d'adaptation intrinsèque des systèmes irrigués communautaires : institutions et infrastructures d'irrigation	54
3.2.2 Les vulnérabilités des systèmes irrigués communautaires face à la « modernité »	55
3.3 Matériels et méthodes	57
3.3.1 Zone d'étude	57
3.3.2 Le périmètre irrigué de Mascara, particularité et état des lieux	58
3.3.3 Protocole d'enquêtes	59
3.4 Résultats	60
3.4.1 Typologie agricole de la zone d'étude	60
3.4.2 Impact sur la satisfaction en eau d'irrigation	63
3.4.3 Impacts sur les pratiques culturales (choix des cultures, mode d'irrigation et intrants)	64
3.4.4 Stratégies des agriculteurs face aux impacts de l'usage non durable des nappes	66
3.5 Discussion	67
3.6 Conclusion	69
<b>Chapitre 4 : Modélisation des pompages en eau d'irrigation par la télédétection</b>	<b>70</b>
4.1 Introduction	71
4.2 Aperçu sur le modèle SAMIR	72
4.2.1 Les données climatologiques (pour obtenir le terme $ET_0$ )	75
4.2.2 L'occupation du sol (pour spatialiser les résultats)	76
4.2.3 Les données phénologiques (pour obtenir le terme $K_c$ )	78
4.2.4 Les données d'apport en eau	80
4.2.5 Les données de pédotransfert (hydrodynamique du sol)	81
4.3 Bilan hydrique, ETR (évapotranspiration réelle)	83
4.4 Cas de parcelle d'agrumes au nord de la Macta	86
4.4.1 Matériel et méthode	86
4.4.1.1 Aire d'étude	86
4.4.1.2 Modélisation par SAMIR	86
4.4.1.3 Application du modèle SAMIR au site d'étude	87
4.4.1.4 Détermination des performances du modèle	90
4.4.1.4.1 L'erreur quadratique moyenne RMSE	90
4.4.1.4.2 Index of agreement « d »	91
4.4.1.4.3 Ratio : volume observé/volume simulé	91
4.4.2 Résultats et discussion	91
4.4.2.1 Estimation de l'irrigation	91
4.4.2.2 Performance du modèle SAMIR	94
4.4.3 Conclusion	95
<b>Chapitre 5 : Gestion concertée de l'eau des grands périmètres irrigués</b>	<b>96</b>
5.1 Introduction	97

5.2 Aperçu général	98
5.2.1 Exploitation du périmètre	99
5.2.2 Les exploitations	99
5.2.3 Caractéristiques de la plaine de Habra	100
5.2.4 Réseau d'irrigation	100
5.2.5 Les ressources en eau	100
5.2.6 Les contraintes du périmètre	102
5.3 Matériels et méthodes	102
5.3.1 Présentation de la zone d'étude	102
5.3.2 Choix de la zone	102
5.3.3 Protocole d'enquêtes	103
5.4 Résultats	104
5.4.1 Négociation des quotas en eau	104
5.4.2 Conduite de l'irrigation au sein du périmètre	105
5.4.3 Adhésion et stratégie d'irrigation	106
5.4.4 Conflit d'usage et taux de satisfaction	107
5.5 Conclusion	108
<b>Conclusion générale</b>	110
<b>Références bibliographiques</b>	113
<b>Annexes</b>	131

## Liste des Figures

<b>Figure 1.</b> Précipitations annuelles à Ain Fekane, de 1930-31 à 2001-02	18
<b>Figure 2.</b> Précipitations annuelles à Ben Badis, de 1930-31 à 2001-0	19
<b>Figure 3.</b> Précipitations annuelles à Ras El Ma, de 1930-31 à 2001-02	19
<b>Figure 4.</b> Précipitations annuelles à Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma de septembre 1930 à août 2002	20
<b>Figure 5.</b> Précipitations mensuelles à Ain Fekane de septembre 1930 à août 1975 et de septembre 1975 à août 2002	21
<b>Figure 6.</b> Précipitations mensuelles à Ben Badis de septembre 1930 à août 1969 et de septembre 1969 à août 2002	21
<b>Figure 7.</b> Précipitations mensuelles à Ras El Ma de septembre 1930 à août 1973 et de septembre 1973 à août 2002	22
<b>Figure 8.</b> Précipitations saisonnières moyennes à Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma de septembre 1930 à août 2002	22
<b>Figure 9.</b> Modèle théorique de la transition de la gestion de l'eau par l'offre à la gestion de la demande en eau : courbe de consommation d'eau induite par la croissance démographique	25+6
<b>Figure 10.</b> Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale $ET_c$ selon la méthode de la FAO-56	30
<b>Figure 11.</b> Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 : Evapotranspiration de référence ( $ET_0$ ), évapotranspiration sous les conditions standards ( $ET_c$ ) et évapotranspiration sous les conditions réelles ( $ET_{c-adj}$ )	33
<b>Figure 12.</b> Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al., 1998)	35
<b>Figure 13.</b> Organigramme de calcul d'évapotranspirations maximale $ET_c$ et réelle ETR par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et al., 1998)	39
<b>Figure 14.</b> Localisation géographique du périmètre de Mascara	51
<b>Figure 15.</b> Typologie culturale et rotation au niveau du périmètre de Mascara 2014	56
<b>Figure 16.</b> Degré de satisfaction en eau d'irrigation selon le type de la ressource	57
<b>Figure 17.</b> Représentation graphique en % des cultures pratiquées selon le type de la ressource	59
<b>Figure 18.</b> Interface de SAMIR	68
<b>Figure 19.</b> Module $ET_0$ , entrée des paramètres de calcul $ET_0$ Penmann-Monteith	69
<b>Figure 20.</b> Spatialisation de l' $ET_0$	70
<b>Figure 21.</b> Classification de l'occupation des sols	70
<b>Figure 22.</b> Seuillage de classification culturale	71
<b>Figure 23.</b> Occupation des sols selon les séries temporelles NDVI sous SAMIR	72
<b>Figure 24.</b> Configuration de $K_c$ en fonction de l'occupation du sol	73
<b>Figure 25.</b> Exemple de $K_c$ statistique	73
<b>Figure 26.</b> Configuration de $K_c$ à partir d'NDVI et interpolation journalière	74
<b>Figure 27.</b> Spatialisation des pluies	75
<b>Figure 28.</b> Configuration de l'hydrodynamique Sol-Plante	76
<b>Figure 29.</b> Configuration des échanges de lux d'eau sol-plante-atmosphère	78
<b>Figure 30.</b> Résultat du bilan hydrique	79

<b>Figure 31.</b> Situation géographique de la zone d'étude	80
<b>Figure 32.</b> Programmateur de contrôle de l'irrigation	82
<b>Figure 33.</b> Électrovanne de contrôle de l'irrigation	82
<b>Figure 34.</b> Evapotranspiration issue de la station de Mostaganem. Mai 2015-Mai 2016 (ONM, 2016)	83
<b>Figure 35.</b> Pluviométrie issue de la station de Mostaganem. Mai 2015-Mai 2016 (ONM, 2016)	84
<b>Figure 36.</b> Schéma de l'approche utilisée dans cette étude	85
<b>Figure 37.</b> Volume de l'eau observé et simulé	87
<b>Figure 38.</b> Comparaison entre les volumes observés et simulés	87
<b>Figure 39.</b> Ratio : volume observé / volume simulé	89
<b>Figure 40.</b> Localisation géographique du périmètre Habra	96
<b>Figure 41.</b> Schéma de la méthodologie d'approche	98
<b>Figure 42.</b> Distribution de l'eau d'irrigation en Hm <sup>3</sup> /an	99
<b>Figure 43.</b> Représentation des taux de surface irriguée (%)	100
<b>Figure 44.</b> Taux de satisfaction des irrigants en eau d'irrigation	102

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Rendement moyen des cultures sur la base du type d'eau utilisé	55
<b>Tableau 2</b> : Caractéristique de la qualité de l'eau (STEP)/source : STEP Mascara, 2014	57
<b>Tableau 3</b> : Indice statistique de performance du modèle SAMIR	88
<b>Tableau 4</b> : Volume d'eau attribué, et surface irriguée dans le périmètre de Habra	94



## Liste des abréviations

AEPI : Alimentation en Eau Potable et Industrie  
CO<sub>2</sub> : Dioxyde de carbone  
CT : Canopy Temperature  
CWSI : Crop Water Stress Index  
DEM : Digital Elevation Model  
ET<sub>0</sub> : Evapotranspiration de référence  
ET<sub>c</sub> : Evapotranspiration maximale  
ET<sub>c-adj</sub> : Evapotranspiration maximale ajusté  
ETR : Evapotranspiration réelle  
Fc : Fraction de couverture végétale (Fraction cover)  
GIC : Groupement d'Intérêt Commun  
GPI : Grand Périmètre Irrigué  
ha : hectare  
Hm<sup>3</sup> : Hectomètre cube  
ITAFV : Institut Technique de l'Arboriculture et de la Vigne  
K<sub>c</sub> : Coefficient cultural  
K<sub>cb</sub> : coefficient de la transpiration  
K<sub>cend</sub> : Coefficient cultural de récolte  
K<sub>cini</sub> : Coefficient cultural initial  
K<sub>cmax</sub> : La limite supérieure de K<sub>c</sub>  
K<sub>cmind</sub> : Coefficient cultural mi-saison  
K<sub>e</sub> : Coefficient d'évaporation du sol  
K<sub>r</sub> : Coefficient de réduction de l'évaporation du sol  
K<sub>s</sub> : coefficient de stress hydrique  
LAI : Leaf Area Index « Indice foliaire »  
MRE : Ministère des Ressources en Eau  
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index  
NDVIs : NDVI d'un sol nu  
ONA : Office National de l'Assainissement  
ONID : Office National de l'Irrigation et de Drainage  
ONM : Office National de Météorologie  
PNDA : Programme National de Développement Agricole  
PPP : partenariats publics-privés  
RAW : l'eau facilement utilisable par la plante  
REUE : réutilisation des eaux usées épurées  
SAMIR : SATellite Monitoring of IRrigation  
SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index  
SDD : Stress Degree Day  
SIG : Systèmes d'Information Géographique  
STEP : STation d'EPuration  
WDI : Water Deficit Index  
WTP : Station of treatment of the Wastewater  
WW : Waste water  
Z<sub>e</sub> : Profondeur de la surface du sol qui subit l'évaporation [0 - 0.15m]  
Z<sub>r</sub> : Profondeur des racines (m)

## Résumé

Désormais, la gestion des ressources en eau en Algérie, comme partout dans le monde, est devenue une priorité absolue. Face à la croissance des besoins agro-alimentaire, le recours à l'intensification culturale s'accélère davantage. Cela se traduit par une mobilisation accrue des ressources en eau, au détriment de l'équilibre des écosystèmes, mettant en péril le concept du développement durable.

En tant qu'unité de gestion intégrée de l'eau, le bassin versant de la Macta se distingue par la diversité des usagers-consommateurs. L'objectif de ce travail est le développement d'une approche méthodologique permettant de combiner trois niveaux de mode de gestion de l'eau, à savoir, la gestion à l'échelle des GPI (grand périmètre irrigué), la gestion à l'échelle des PMH (petite et moyenne hydraulique), et enfin la gestion à l'échelle de l'exploitation.

La démarche adoptée consiste à mener des enquêtes auprès des exploitations sur ses trois modes de gestion (GPI, PMH et GIC). Au niveau du GPI du périmètre irrigué de Habra, les entretiens ont porté sur l'offre et la demande en eau, sur les quotas alloués ainsi que sur les modalités d'adhésion au plan de gestion. Pour l'aire d'irrigation d'El Kouir en tant que PMH, notre intérêt a porté sur la diversification des ressources mobilisées, sur leurs impacts agricoles, ainsi que sur le mode de partage par la communauté des agriculteurs (GIC).

Le recours à la modélisation par l'outil SAMIR (Satellite Monitoring of Irrigation) basé sur l'imagerie satellitaire a permis de mettre en évidence les conséquences d'une gestion aléatoire et concurrente de l'eau des nappes, en procédant à des investissements colossaux pour la recherche de l'eau plus profondément, ce qui conduit à une surexploitation des eaux souterraines.

Les résultats de la méthode utilisée montrent une corrélation pertinente, enregistrant un indice RMSE de  $0.11\text{m}^3/\text{jour}$ , et un indice d'agrément de 80.94. Ces deux indices mettent en évidence le rapprochement entre les irrigations réelles supposées pertinentes et les irrigations simulées basées sur le modèle SAMIR. Finalement, ces résultats révèlent l'importance de la gestion efficace de l'eau, par l'organisation collective dans le partage de ce bien communautaire.

**Mots clés :** Bassin versant de la Macta ; Modélisation ; Gestion intégrée des ressources en eau ; Echelle ; GPI-PMH-exploitation individuelle.

## **Abstract**

From now on, the management of water resources in Algeria, as everywhere in the world, has become a top priority. Faced with growing agri-food needs, the use of crop intensification is accelerating. This translates into greater mobilization of water resources, to the detriment of the equilibrium of ecosystems, jeopardizing the concept of sustainable development.

As an integrated water management unit, the Macta watershed is distinguished by the diversity of users and consumers. The aim of the present work is the development of an approach allowing to combine and superimpose three levels of water management mode, for a better global understanding, namely, management at the GPI (Grand Perimeter Irrigated) level, the management at the SMH (Small and Medium Hydraulic) level, and finally the management at the exploitation level.

The approach adopted is to conduct farm surveys on its three management modes (GPI, PMH and GIC). At the level of the GPI of the irrigated perimeter of Habra, the interviews focused on water supply and demand, on allocated quotas as well as on how to join the management plan. For the El Kourir irrigation area as SMH, our interest focused on the diversification of the resources mobilized, on their agricultural impacts, as well as on the mode of sharing by the community of farmers (GIC).

The use of SAMIR (Satellite Monitoring of Irrigation) modeling based on satellite imagery has made it possible to highlight the consequences of random and competing management of groundwater, by making colossal investments for deeper water research, which leads to overexploitation of groundwater.

The results show a significant correlation and highlighted the relevance of the method, we recorded an RMSE index of  $0.11 \text{ m}^3/\text{day}$ , and an index of approval of 80.94. These two indices reveal the rapprochement between the real irrigations that are supposed to be relevant and the simulated irrigations based on the SAMIR model.

Finally, these results have highlighted the importance of the effective management of water, of the collective organization in the sharing of this community property.

**Keywords:** Macta watershed; modelization ; integrated water resources management ; scale ; LIP-SMH-individual exploitation.

## ملخص

من الآن فصاعداً، أصبحت إدارة الموارد المائية في الجزائر، كما في كل مكان في العالم، أولوية قصوى. أمام تزايد الاحتياجات الغذائية الزراعية، يتسارع استخدام تكتيف المحاصيل. وهذا يترجم إلى تعبئة أكبر لموارد المياه، مما يضر بتوازن النظم الإيكولوجية، مما يهدد مفهوم التنمية المستدامة. وبوصفه وحدة متكاملة لإدارة المياه، يتميز حوض تجميع مياه ماكتا بتنوع المستخدمين والمستهلكين.

الهدف من هذا العمل هو تطوير مقارنة تسمح بدمج وترتيب ثلاثة مستويات من نمط تسيير المياه من أجل فهم عام أفضل، وهي التسيير على مستوى المحيط المسقي الكبير (GPI)، التسيير على مستوى المائية الصغيرة والمتوسطة (PMH)، وأخيراً التسيير على مستوى الاستغلال.

يتمثل النهج المتبع في إجراء مسوحات زراعية حول أساليب الإدارة الثلاثة (GPI و PMH و GIC). على مستوى GPI للمحيط المروي في هبرة، ركزت المقابلات على العرض والطلب على المياه، على الحصص المخصصة وكذلك على طرق الالتزام بخطة الإدارة. بالنسبة لمنطقة الري في القوير باعتبارها PMH، كان اهتمامنا ينحصر في تنويع الموارد المعبأة، وتأثيراتها الزراعية، وكذلك طريقة المشاركة من قبل مجتمع المزارعين (GIC). إن استخدام نموذج SAMIR (المراقبة عن طريق السواتل للري) القائم على صور الأقمار الصناعية قد جعل من الممكن تسليط الضوء على تبعات الإدارة العشوائية والمتزامنة للمياه الجوفية، من خلال استثمارات ضخمة في البحث عن المياه بشكل أكثر عمقا، مما يؤدي إلى الإفراط في استغلال المياه الجوفية.

كما قدرنا نموذج تسيير مياه الري في مزرعة خاصة، حيث أجرينا مقارنة بين الكميات الموزعة فعلياً من قبل المزارع والأحجام التي تم محاكاتها بواسطة نموذج رصد الري عن طريق الأقمار الصناعية SAMIR الذي يعتمد صور الأقمار الصناعية، حيث أظهرت النتائج وجود ارتباط كبير مبرزة فعالية الطريقة، حيث سجلنا مؤشر RMSE في حدود 0.11 م3 في اليوم ومؤشر الموافقة 80.94 حيث تظهر هاتان النتيجتان مدى التقارب بين الري الحقيقي الذي من المفترض أن يكون فعالاً والمحاكاة على أساس نموذج SAMIR.

وأخيراً، أبرزت هذه النتائج أهمية الإدارة الفعالة للمياه، والتنظيم الجماعي في تقاسم هذه الملكية المجتمعية.

**الكلمات الرئيسية :** حوض تجميع مياه ماكتا ; تصميم ; الإدارة المتكاملة للموارد المائية ; المستويات ; GPI-PMH- الاستغلال الفردي.

# **Introduction générale**

## **1.1 Préambule**

La gestion des ressources en eau offre un débat qui prend un caractère à la fois prospectif et actif depuis plusieurs décennies. Ce débat qui se déroule à l'échelle mondiale vise essentiellement à orienter les politiques actuelles de gestion de la ressource en eau vers une meilleure prise en compte des enjeux à long terme.

Parmi ces enjeux, réside la question de l'équilibre entre l'offre et la demande en eau. Selon Treyer (2006), c'est l'enjeu de la soif, soif symbolique, soif de tout un territoire, de toute une région ou de tout un pays qui est centré sur les aspects quantitatifs de la gestion de l'eau à long terme. C'est cet enjeu frappant de l'équilibre entre quantités disponibles et quantités consommées pour un besoin vital (ainsi que pour d'autres usages) qui anime le plus fortement le débat mondial sur la gestion des ressources en eau.

Par ailleurs, le rapport de Stedman (2007), affirme que la rareté et la sur-allocation sont souvent provoquées par une approche basée sur l'offre en vue du développement, qui ne tient pas suffisamment compte des limites des systèmes hydrauliques. Les approches politiques adoptées insistent sur le fait que dans la plupart des cas, leur vision prépondérante intéressant l'eau prend le pas sur la faisabilité hydrologique des projets alors que leurs conséquences sociales, en termes de frustration et de privation pour des groupes spécifiques d'utilisateurs, ne sont pas bien évaluées (Stedman, 2007).

Depuis quelques années, on s'est aperçu, sous l'effet des aléas climatiques, de la période de sécheresse et des diverses sources de pollution, qu'il n'est plus possible d'agir sans cesse sur l'offre pour anticiper la demande, mais d'inverser cette tendance (Akli, 2015).

Selon Garadi (1992), ce regain d'intérêt à l'égard de la demande a engagé une réflexion sur la nécessité de renouvellement des méthodes où les objectifs de planification à long terme doivent être rattachés aux impératifs de gestion à court et à moyen termes.

Selon la Commission Méditerranéenne pour le Développement Durable (1998), la possibilité d'économiser de l'eau doit être envisagée à chaque étape de la gestion de l'eau.

## **1.2 Structuration de la thèse**

La politique algérienne de gestion de l'eau a été depuis une dizaine d'années, plus axée sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une meilleure utilisation des ressources déjà disponibles (Benblidia, 2011). Ce qui mène directement à l'épuisement des

ressources y compris souterraines, à la dégradation des milieux et finalement à l'appauvrissement du pays (Guy Meublat, 2001). Selon Amzert (2010) cette approche strictement quantitative est privilégiée autour d'un modèle dominant de gestion qui promet l'abondance de la ressource et qui de fait, aggrave la pénurie.

Ces ressources limitées sont caractérisées par une grande disparité géographique et par une forte sensibilité aux aléas climatiques. La situation est particulièrement préoccupante en milieu rural où l'on enregistre un déficit important en matière d'alimentation en eau potable et en eau d'irrigation.

L'irrigation est le principal consommateur d'eau en Algérie, 62% des ressources en eaux mobilisées vont à l'agriculture (MRE, 2003), une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau dans le domaine agricole s'avère donc nécessaire. Une des premières solutions pour économiser l'eau dans ce domaine consiste à piloter la demande, c'est-à-dire, optimiser les apports en fonction des besoins réels de la culture à un moment donné de son développement en tenant compte des conditions environnementales.

Le présent thème vise à l'élaboration d'un mécanisme conceptuel de gouvernance pouvant faire face à la surexploitation des ressources en eau. Afin que l'utilisation de l'eau soit plus rationnelle, il est nécessaire de s'adapter aux aspects sociaux agricoles régissant au sein des communautés des irrigants, d'améliorer sa rentabilité et de faciliter la gestion et la programmation des irrigations, d'avoir une vision globale sur la dynamique hydrique à différentes échelles géographiques.

L'expression socio-agricole désigne les comportements, les interactions collectives et individuelles autour d'une ressource commune, les stratégies privilégiées par les agriculteurs et la durabilité des systèmes agraires.

L'expression programmation de l'irrigation décrit la procédure par laquelle un irrigant détermine la périodicité et le dosage des applications d'eau. Lorsque l'on programme l'irrigation, on se pose les deux questions suivantes : quand faut-il irriguer ? Et quelle quantité d'eau faut-il appliquer/apporter ? Pour cela, il est souhaitable de connaître les facteurs climatiques et édaphiques, les techniques et les conditions agronomiques d'exploitation des parcelles agricoles (stades phénologiques et critiques).

L'expression vision globale sur la dynamique hydrique à différentes échelles géographiques fait référence aux interactions entre différents usagers de la ressource sur une échelle plus large de l'ordre du bassin versant. Les périmètres irrigués (GPI) à partir des barrages, tel que celui de Habra dans le bassin versant de la Macta, constitue un bon exemple d'étude, ce dernier a connu un déclin exemplaire en termes de quotas en eau alloués à son égard, ce qui fait autrefois la ressource du périmètre, fait aujourd'hui la ressource potable pour une population de plus en plus extensible.

L'objectif de ce travail permet d'approcher la gestion des ressources en eau agricole au niveau du bassin versant de la Macta, en divisant ce dernier sur trois cas distincts, différents et complémentaires, à savoir : 1- La PMH de Mascara (périmètre d'El Kour) ; 2- Une exploitation agrumicole privée ; 3- Le GPI de Habra.

Il s'agit de modéliser la GIRE en combinant les trois échelles, chacune d'une manière différente, selon ses caractéristiques socio-agricoles.

L'approche consacrée à la PMH consiste à la compréhension des interactions entre usagers, et des combinaisons des différents types de ressource en eau dans l'irrigation, notamment l'eau souterraine comme source principale et l'eau de surface comme source secondaire, dont la gestion de l'irrigation est confiée à la communauté agricole, et qualifiée de gestion cogérée.

L'approche adoptée pour la gestion de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation par l'utilisation du modèle SAMIR (Satellite Monitoring of Irrigation) basé sur l'imagerie satellitaire et le modèle FAO-56, consiste tout d'abord à la connaissance de l'occupation du sol, à la connaissance des caractéristiques pédologiques et phénologiques de notre exploitation agrumicole située au nord de la Macta.

L'outil SAMIR permet de modéliser à l'échelle spatiale les facteurs  $ET_0$  et  $K_c$ , et de ce fait les besoins théoriques en eau des agrumes que nous avons ensuite comparé aux irrigations réelles appliquées par l'irrigant. Nous avons considéré que ces dernières correspondent aux besoins réels de l'exploitation car l'irrigant utilise des équipements de haute technologie de pilotage de l'irrigation.

La méthode utilisée dans le cas de GPI a mis l'accent sur la question : comment les irrigants du périmètre de Habra (Mohamadia) au nord de la Macta arrivent à maintenir la vocation agrumicole du périmètre dans un contexte de ressource unique et rare ? Nous avons procédé par des enquêtes auprès des institutions Etatiques et auprès des associations des irrigants afin de permettre une meilleure caractérisation de la demande en eau au sein de l'exploitation, mettre



en évidence les circuits et les stratégies adoptées par les agriculteurs ainsi leur implication dans le processus de la décision de cette gestion de la ressource dans une logique de concertation partagée entre usagers et détenteurs de la ressource.

De ce fait, le manuscrit est structuré sur cinq chapitres, le premier sera consacré à la gestion des ressources en eau par l'offre et la demande, au contexte national de l'eau en Algérie, d'une façon globale, il présente la politique de l'eau en Algérie et les potentialités hydriques.

Le deuxième chapitre portera sur les théories de l'estimation des besoins en eau des cultures, notamment le modèle FAO-56.

Le chapitre 3, sera consacré au modèle de gestion communautaire, cas de l'utilisation conjonctive des eaux conventionnelles et non conventionnelles. Le périmètre périurbain de Mascara (El Kouir) a fait l'objet d'une étude dans le cadre de cette thèse.

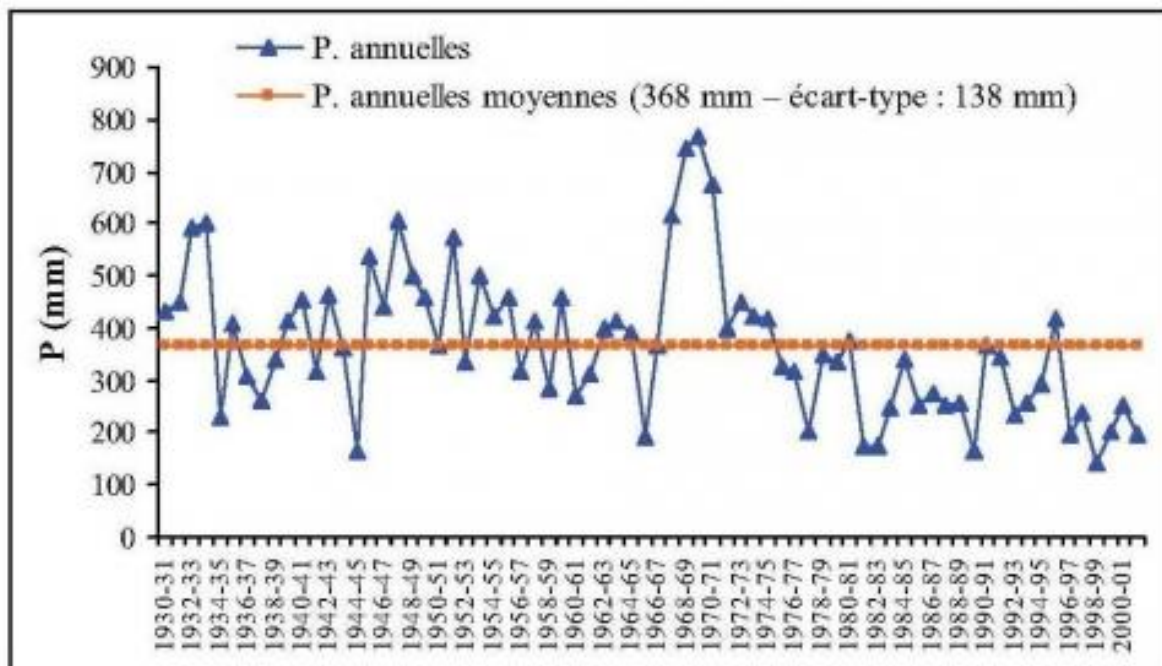
Le chapitre 4, portera sur l'intérêt de la modélisation des pompages en eau par le recours à la télédétection, le modèle SAMIR-FAO-56 (Sattelite Monitoring of Irrigation) est appliqué à l'irrigation d'une parcelle d'agrumes de 20 hectares.

Le chapitre 5, traite la question relative à la gestion de l'eau au niveau des GPI (Grand périmètre Irrigués).

### 1.3 Aperçu climatique de la Macta

Le bassin versant de la Macta est soumis à un climat méditerranéen au nord. Une tendance continentale s'affirme au sud, qui se traduit par une aridité marquée avec des hivers froids et des étés particulièrement chauds (Meddi et al., 2009). En considérant les années climatiques (du 1<sup>er</sup> septembre au 31 août), les précipitations annuelles moyennes sur la période 1930-2002 varient de 230 mm à Ras El Ma (dans la partie sud du bassin) à 559 mm à Aouf (au pied des montagnes de Beni Chougrane) (Meddi et al., 2009). Sur la période septembre 1930 - août 2004, les précipitations annuelles ont dépassé 800 mm en deux stations d'observation seulement, il s'agit de la station de Aouf où la valeur annuelle de 800 mm a une période de retour d'une douzaine d'années (loi de GAUSS) et les précipitations ont atteint 991 mm en 1943 (période de retour : 149 ans), la deuxième station étant Ben Badis (Meddi et al., 2009).

L'étude menée par Meddi et al. (2009) montre que le rapport entre les précipitations annuelles maximales et minimales est proche de 4 ou 5 dans les stations humides (767 mm / 141 mm à Ain Fekane ; 807 mm / 176 mm à Ben Badis), mais ce rapport est plus fort dans les stations sèches (542 mm / 36 mm à Ras El Ma). Cette irrégularité interannuelle des précipitations est illustrée par les figures 1, 2 et 3, pour les stations d'Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma.



**Figure 1.** Précipitations annuelles à Ain Fekane, de 1930-31 à 2001-02 (Meddi et al., 2009).

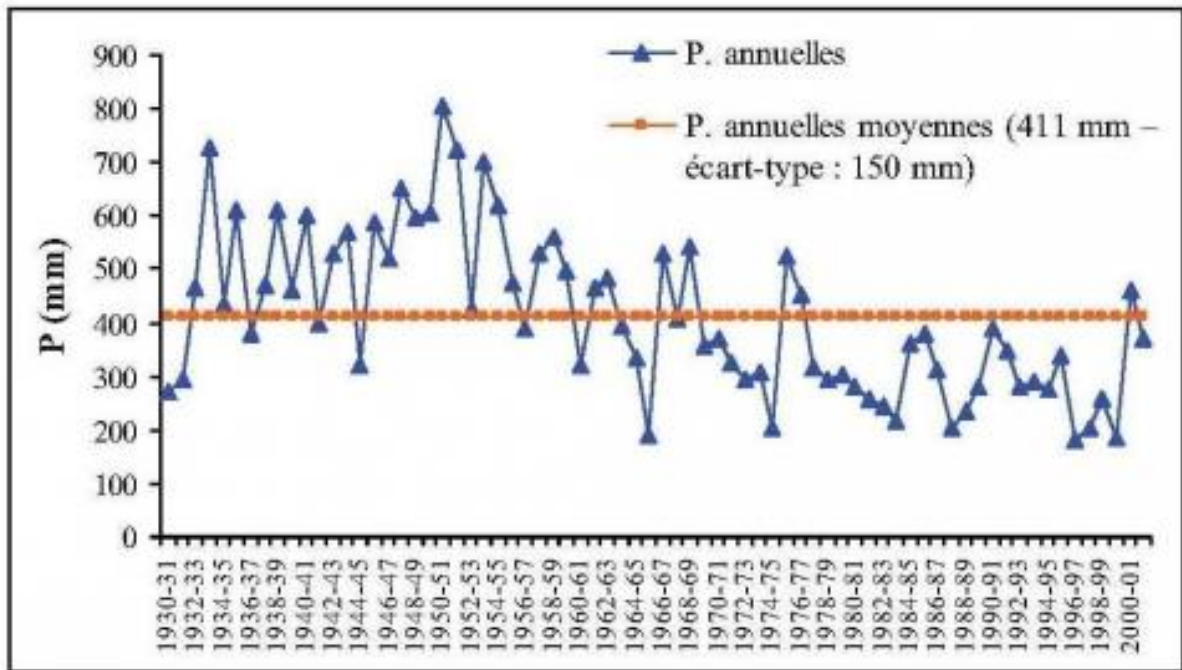


Figure 2. Précipitations annuelles à Ben Badis, de 1930-31 à 2001-0 (Meddi et al., 2009).

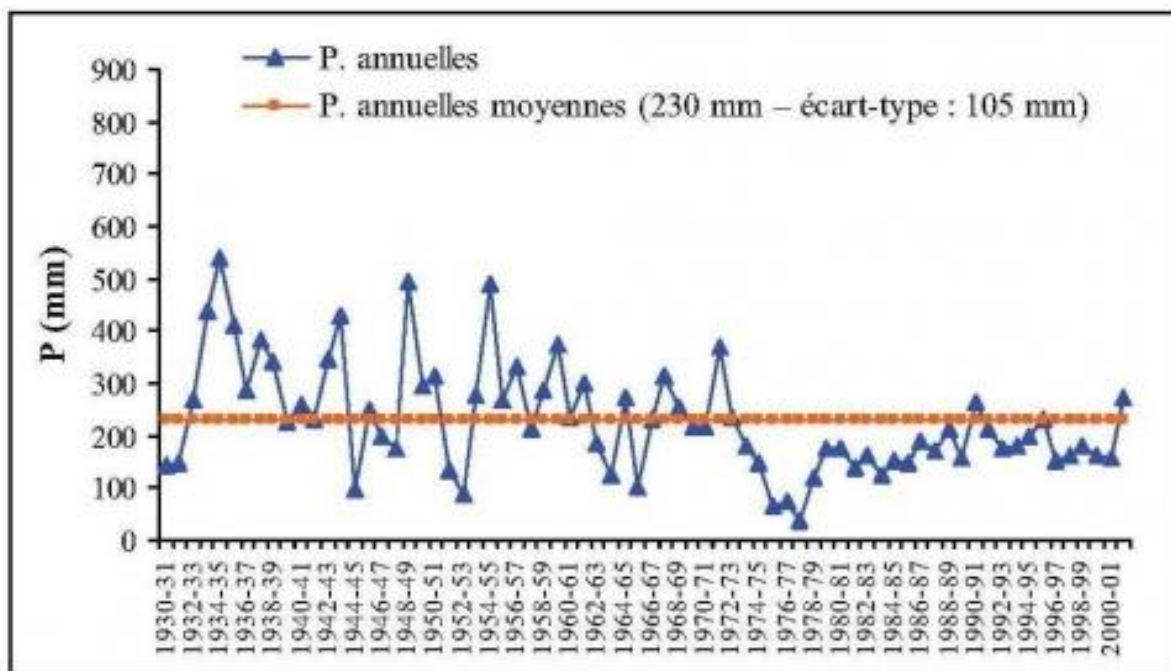
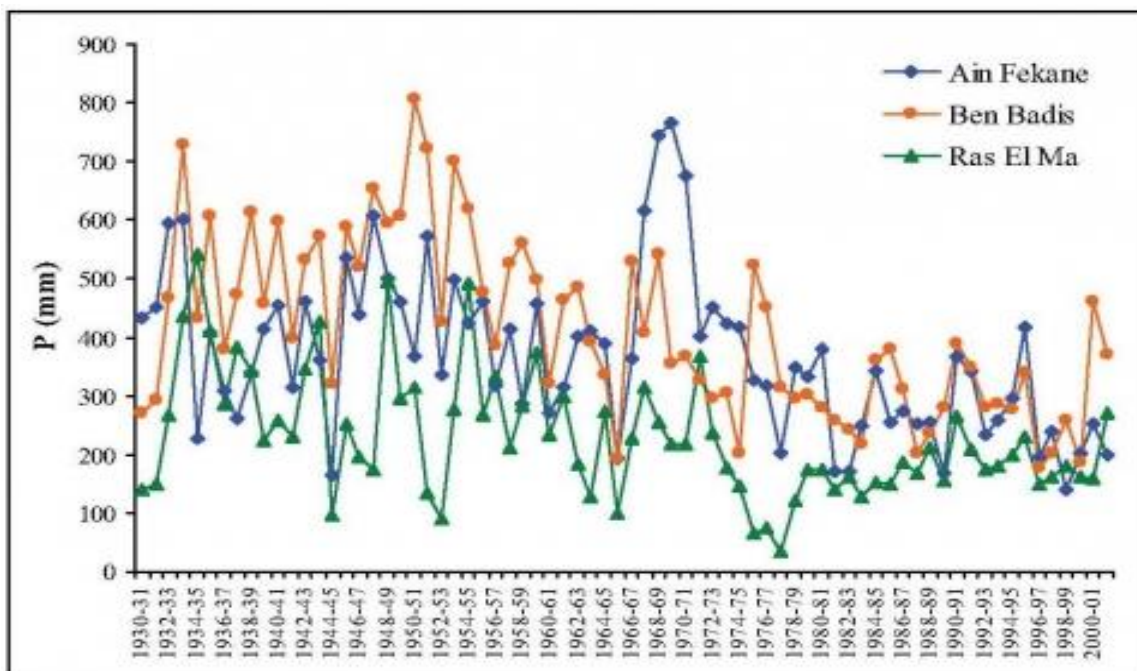


Figure 3. Précipitations annuelles à Ras El Ma, de 1930-31 à 2001-02 (Meddi et al., 2009).

Laborde (1993) in Meddi et al. (2009) a mis en évidence une succession de quatre phases pluviométriques, sur la base d'une étude portant sur 120 stations pluviométrique au Nord de l'Algérie :

- Une longue phase où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'ouest et au centre du pays (déficit de l'ordre de 11 %).
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972 environ.
- Une longue phase sèche qui s'affirme dès la fin de 1973.

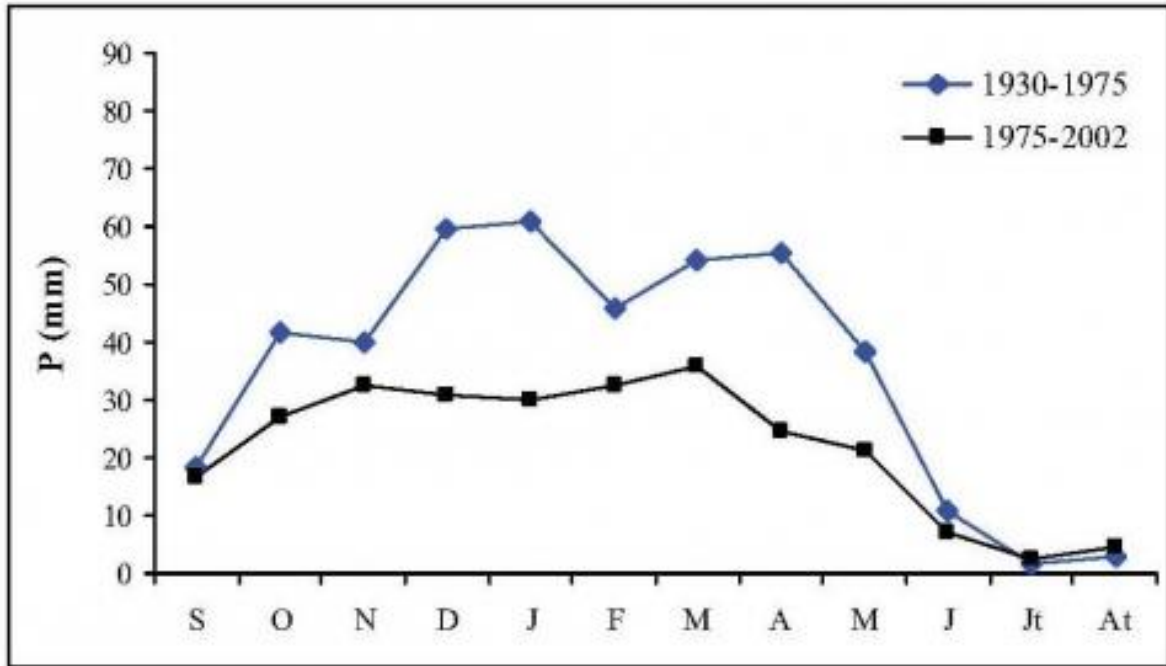
Les précipitations annuelles enregistrées aux niveaux des différentes stations ne varient pas toujours avec la même ampleur, ni même parfois dans le même sens comme le montre la figure 4. Les valeurs minimales et maximales ne se placent pas partout aux mêmes dates (Meddi et al., 2009).



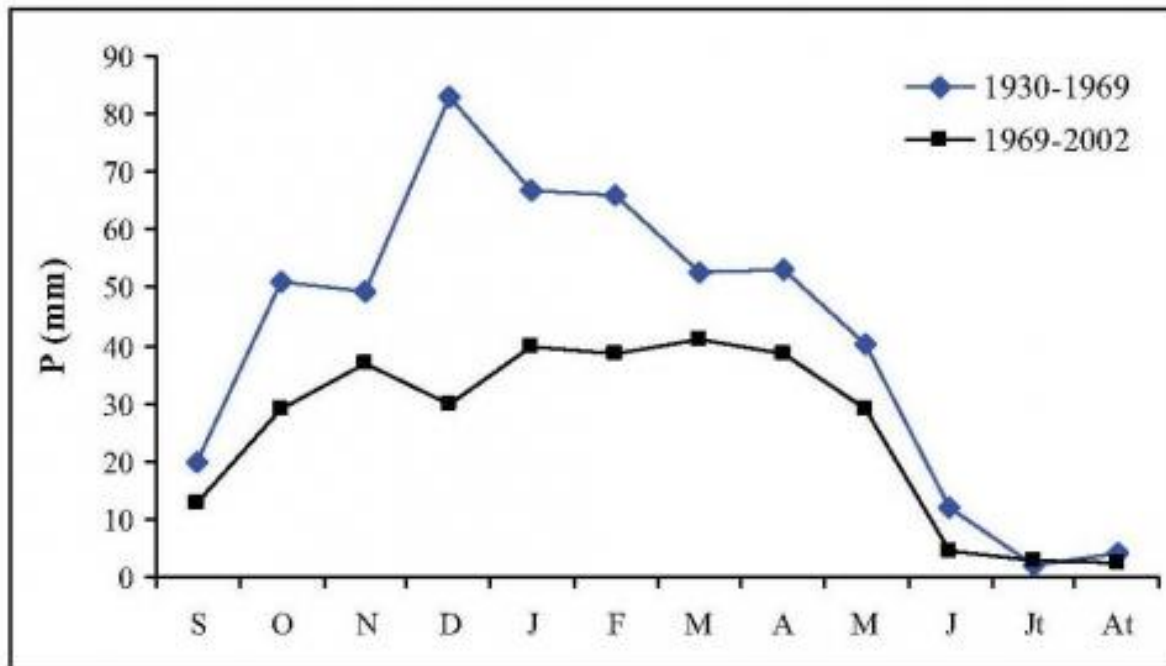
**Figure 4.** Précipitations annuelles à Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma de septembre 1930 à août 2002 (Meddi et al., 2009).

Entre la fin des années 1960 et celle des années 1970, une rupture dans la stationnarité des séries pluviométriques est mise en évidence (Meddi et Humbert, 2000 ; Talia, 2003 ; Meddi et Hubert, 2003). Sur le bassin versant de la Macta, la rupture de stationnarité s'est produite en fin 1968-69 au niveau de la station de Ben Badis, à Ras El Ma en fin 1972-73 et à Ain Fekane en fin 1974-75 (Meddi et al., 2009). Les figures (5, 6 et 7) montrent que les mois les plus pluvieux s'étendent d'octobre à mai, les mois de juin, juillet et août sont extrêmement secs (Meddi et al.,

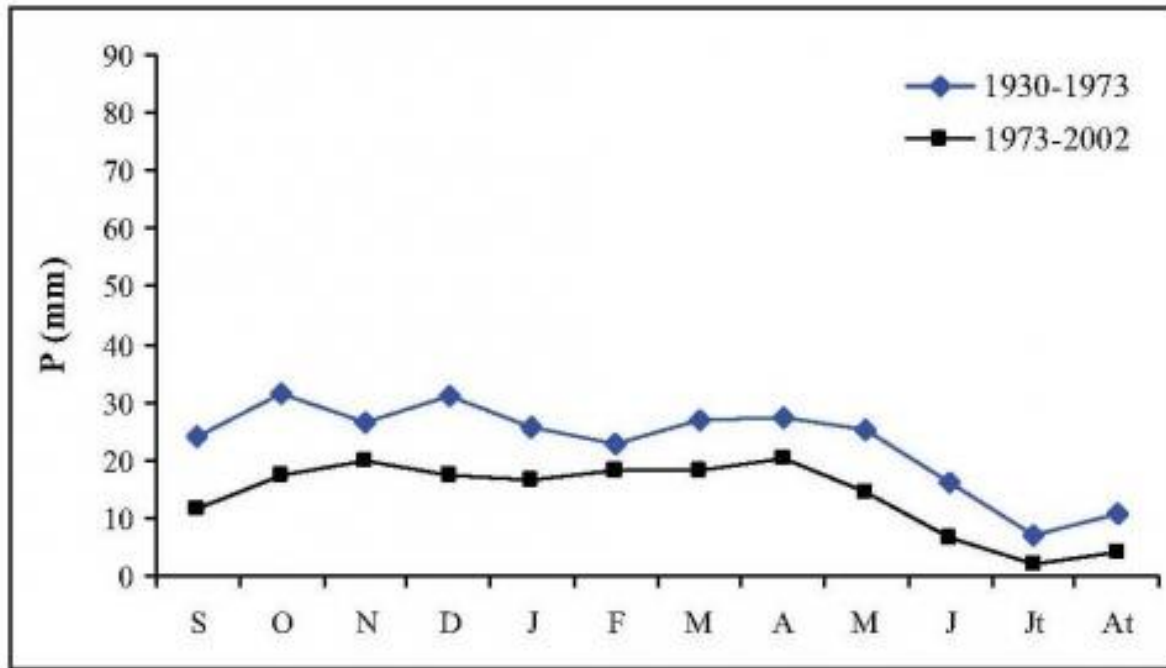
2009). La station de Ras El Ma montre des précipitations saisonnières presque égales de l'automne au printemps (figure 8).



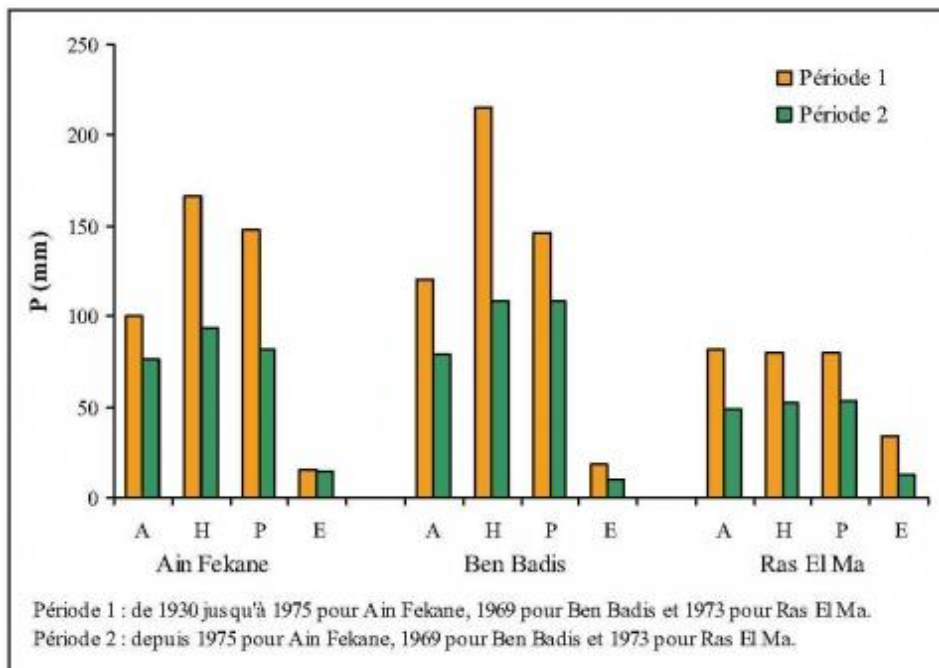
**Figure 5.** Précipitations mensuelles à Ain Fekane de septembre 1930 à août 1975 et de septembre 1975 à août 2002 (Meddi et al., 2009).



**Figure 6.** Précipitations mensuelles à Ben Badis de septembre 1930 à août 1969 et de septembre 1969 à août 2002 (Meddi et al., 2009).



**Figure 7.** Précipitations mensuelles à Ras El Ma de septembre 1930 à août 1973 et de septembre 1973 à août 2002 (Meddi et al., 2009).



**Figure 8.** Précipitations saisonnières moyennes à Ain Fekane, Ben Badis et Ras El Ma de septembre 1930 à août 2002 (Meddi et al., 2009).

Depuis les années 1970 le bassin de la Macta connaît une longue période de sécheresse, ce qui réduit ses ressources en eau mobilisables. Sur la période 1930-2002, les précipitations annuelles ont enregistré une baisse de l'ordre de 40 % en moyenne après la rupture de la stationnarité des chroniques pluviométriques. La sécheresse se poursuit actuellement, puisqu'à titre d'exemple, à Sidi Bel Abbès les précipitations annuelles moyennes ont été de 259 mm seulement de

septembre 2002 à août 2007, contre 292 mm de septembre 1980 à août 2002 (Meddi et al., 2009).

# **Chapitre 1**

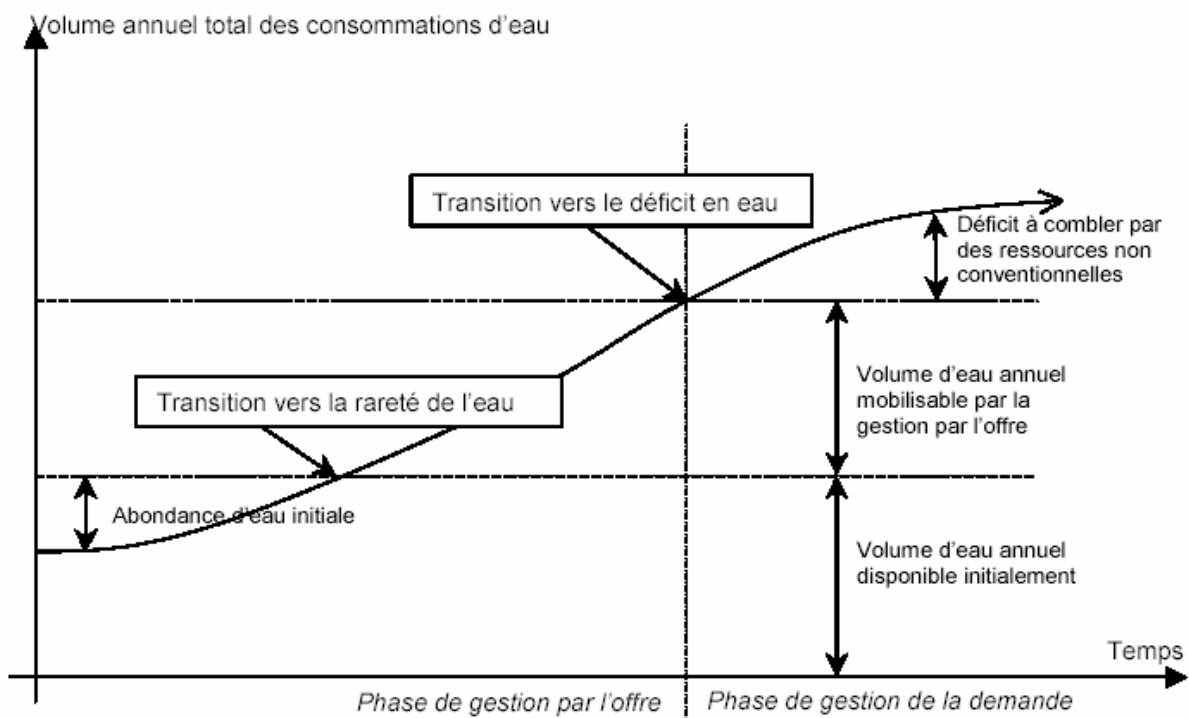
## **La gestion de l'offre–demande en eau**



### 1.1 La transition de la gestion de l'offre à la gestion de la demande

Selon Treyer (2006), la transition majeure vers un équilibre durable entre ressource et demande en eau est supposée être essentiellement liée à la transition démographique (liée aux besoins en eau potable et en eau d'irrigation par les objectifs de sécurité alimentaire).

Grâce à ce modèle général de courbes de transition (figure 9), les auteurs proposent d'expliquer le phasage (constaté sur leurs différents terrains) entre une gestion de la ressource en eau axée sur l'augmentation de l'offre, tant que cela est possible dans les limites des ressources naturelles. Une deuxième phase de gestion de la demande en eau, consiste à infléchir la courbe de croissance de la demande, lorsque la mobilisation de ressources supplémentaires est trop coûteuse.



Source : (Treyer, 2006)

**Figure 9.** Modèle théorique de la transition de la gestion de l'eau par l'offre à la gestion de la demande en eau : courbe de consommation d'eau induite par la croissance démographique

### 1.2 Le contexte national de la gestion des ressources en eau

La gestion de l'eau à travers le monde est en train de subir de profonds bouleversements à cause de la rareté de cette ressource. Sa gestion qui repose sur la comparaison entre le niveau des ressources en eau disponibles et les demandes pour différents usages constitue une problématique majeure pour le développement durable des régions méditerranéennes, même dans les régions où le climat est le moins aride. (Maton, 2008).

La complexité de la problématique de l'eau en Algérie, particulièrement celle du Nord du pays s'explique par la politique algérienne de gestion de l'eau qui a été depuis une dizaine d'années axée sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une meilleure utilisation des ressources déjà disponibles. Priorité donnée au développement de l'offre et non à la gestion de la demande. En témoigne la part prépondérante accordée jusqu'à présent dans les budgets d'investissements à l'augmentation des capacités de stockage et au développement des grandes infrastructures de transfert et d'adduction, face à la faiblesse des financements consacrés à l'entretien, à la maintenance et à l'amélioration des performances des systèmes de distribution d'eau (Saka, 2013).

L'évolution considérable de la demande en eau en Algérie, liée principalement à l'accroissement rapide de la population, à l'urbanisation et à l'élévation du niveau de vie, conjuguée aux aléas climatiques caractérisés par un déficit pluviométrique évalué à 30% (Akli, 2015) ont fortement contribué à aggraver le déséquilibre entre une demande en eau croissante et une offre jusque-là limitée par les insuffisances au niveau du plan de la mobilisation des ressources potentielles, et au niveau de la de gestion des ressources disponibles. La croissance démographique est le principal facteur conduisant à des situations locales de déséquilibre entre les besoins en eau et les ressources disponibles. En Algérie, la demande en eau augmente de plus en plus avec le temps et exige une croissance proportionnelle de l'offre. La mobilisation de la ressource n'a jamais cessé de progresser, mais cette croissance est insuffisante et inférieure à celle de la demande, entraînant un écart entre le volume demandé et celui offert par les services de l'eau (Bessedik, 2007).

Cet état de fait, a conduit les pouvoirs publics à adopter une nouvelle politique nationale de l'eau qui est un ensemble de réformes qui prend en considération la mobilisation, la gestion et l'utilisation des ressources en eau en prenant en compte trois points clés (Yessad, 2012) :

- Les principes (cadre réglementaire, gestion intégrée, efficience de l'eau agricole, politique tarifaire) ;
- Les institutions par bassins hydrographiques et restructuration des agences nationales et régionales ;
- Les priorités (alimentation en eau potable, transferts d'eau, etc.).

Après l'année hydrologique 2001-2002 où le potentiel stratégique des réserves en eau a atteint son niveau le plus faible et où le déficit hydrologique a dépassé 50%, notamment dans les régions Centre et Est (MRE, 2003), le Ministre des Ressources en Eau de l'époque affirmait que « jamais l'Algérie n'était arrivée à un niveau de réserves en eau aussi bas » soutenant que

« les nappes souterraines étaient surexploitées » et « qu'aucune autre ressource non conventionnelle n'était disponible à cette période » (Sellal, 2005).

Pour redresser cette situation, c'est la stratégie tournée vers l'offre d'eau qui a dominé la scène. La politique algérienne de gestion de l'eau a été depuis une dizaine d'années axée sur la mobilisation de nouvelles ressources que sur la recherche d'une meilleure utilisation des ressources déjà disponibles (Benblidia, 2011), et il apparaît de plus en plus clairement que cette stratégie en voulant satisfaire, voire anticiper les besoins en eau en adaptant l'offre à la demande, mène directement à l'épuisement des ressources et à la dégradation des milieux et finalement à l'appauvrissement du pays (Meublât, 2001).

Selon Benblidia (2011), les préoccupations très fortes de l'économie des ressources en eau n'ont pas été portées et encadrées par une politique globale d'économie des ressources en eau. Selon cet auteur, «elles s'expriment dans tous les plans sectoriels à travers différentes mesures dont l'objectif est de réduire les pertes et les gaspillages, et de maîtriser les demandes. Mais la faiblesse relative des moyens de mise en œuvre de ces mesures en réduit l'importance et la priorité, autrement dit, « la gestion de la demande n'apparaît pas dans la politique de gestion des ressources en eau en tant que priorité stratégique, elle s'est juste traduite par des orientations, des décisions réglementaires et quelques actions visant à réduire les gaspillages et les pertes d'eau tout au long du processus production-utilisation » (Benblidia, 2011).

### **1.2.1 La politique de l'eau en Algérie**

La gestion du secteur de l'eau en Algérie s'organise principalement dans le cadre de la Loi relative à l'eau (loi 0512 du 4 août 2005). Cette loi fondamentale est issue du Code de l'eau de 1983. Celui-ci a subi des modifications successives pour prendre en compte les évolutions économiques du pays et pour adopter les principes et les règles applicables pour l'utilisation, pour la gestion et pour le développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale.

La loi sur l'eau de 2005 consacre le droit d'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous, et fixe les objectifs suivants :

- L'utilisation rationnelle et planifiée des eaux pour la satisfaction des besoins des populations et de l'économie nationale ;
- La protection des eaux contre la pollution, le gaspillage et la surexploitation ;
- La prévention contre les effets nuisibles de l'eau ;
- L'obligation d'élaborer un plan national de l'eau et la planification de la gestion locale dans le cadre des bassins hydrographiques ;

- L'établissement de règles régissant les systèmes de tarification de l'eau pour les usages domestiques, industriels et agricoles, appuyées par la prise en compte des coûts réels des services d'approvisionnement ;
- La possibilité de concession ou de délégation du service public de l'eau à des personnes morales de droit public ou privé.

### **1.2.2 Intégration des principes de la GIRE dans la politique nationale**

La concurrence entre les différents usages de l'eau (domestique, industrielle et agricole) et les interactions entre l'eau et les questions énergétiques et alimentaires ont incité les autorités algériennes à passer d'une politique sectorielle à une politique intégrée de l'eau. L'Algérie affiche notamment une volonté pour mieux exploiter son potentiel agricole afin de réduire la dépendance et la facture alimentaire du pays tout en s'adaptant aux contraintes hydro-climatiques. La pression croissante sur les ressources en eau d'ici 2050 devra tenir compte de la nécessité d'étendre les surfaces irriguées, d'alimenter en eau une population plus nombreuse et de répondre aux besoins potentiels en eau du secteur énergétique (exploitation du gaz de schiste avec fracturation hydraulique, utilisation pour le fonctionnement et l'entretien de centrales solaires, etc.).

La politique de l'eau annoncée et mise en place par les autorités algériennes porte à s'interroger sur la poursuite des efforts sur la durée et sur l'inscription de ces projets à long terme pour relever les défis économiques, environnementaux et sociaux auxquels le pays fait face. À long terme, le développement économique en Algérie passe par une articulation des politiques hydrauliques agricoles et énergétiques. Les défis sociaux (accès à l'eau potable en quantité et en qualité suffisante, tarification sociale, partage de l'eau entre les territoires, etc.) et environnementaux (renouvellement des nappes souterraines, limitation des émissions de CO<sub>2</sub>, réduction des rejets polluants, sauvegarde des écosystèmes, etc.) sont les deux indicateurs d'un développement pérenne, leur prise en compte lors de l'élaboration de tout projet dans le secteur de l'eau devrait être acquise.

Pour évaluer le cadre juridique et réglementaire pour la gestion et la conservation des ressources en eau en Algérie, il est fait référence aux principes et règles universels qui prévoient un cadre général souhaité pour la gestion intégrée des ressources en eau. Ce cadre renvoie aux principes suivants (Cap-Net, 2005) :

- Principe écologique : Les eaux douces sont une ressource finie et vulnérable, essentielle pour le maintien de la vie, le développement et l'environnement ;
- Principe institutionnel : La mise en valeur et l'aménagement des eaux doivent s'appuyer sur une démarche participative, impliquant les usagers, les planificateurs et les décideurs à

tous les niveaux ; les femmes jouent un rôle crucial dans la fourniture, la gestion et la protection des eaux ;

- Principe instrumental : L'eau a une valeur économique dans toutes ces utilisations concurrentes et devrait être reconnue comme un bien économique.

### **1.2.3 Transfert de savoir-faire et gestion déléguée des services publics**

La provision des services d'eaux potable et d'eaux usées par le secteur public n'est pas une garantie que celle-ci soit produite efficacement (Boyer et al., 2001), la participation du secteur privé à l'approvisionnement en eau peut souvent générer des bénéfices substantiels et tangibles pour la population. En effet, en l'absence de marchés compétitifs, le recours à l'entreprise privée n'entraînera une augmentation de bien-être qu'à la condition que les gouvernements développent un cadre institutionnel et réglementaire adéquat. C'est le problème de la gouvernance (Boyer et al., 2001). Les PPP (Partenariats Publics-Privés) dans les pays en développement, sont négociés au cas par cas en s'appuyant sur les codes et sur les législations propres à chaque secteur (Breuil, 2004).

Dans le secteur de l'eau en Algérie, ils sont réglementés par la nouvelle loi sur l'eau, promulguée en 2005, qui fixe les conditions de participation du secteur privé sous forme de gestion déléguée par contrat. Les PPP gagneraient à s'orienter vers de nouvelles approches au niveau des contrats, du financement, de la régulation et de l'implication des parties prenantes.

### **1.3 Potentialités hydriques de l'Algérie en quelques chiffres**

Il faut rappeler que la consommation par habitant et par an en Algérie a été divisée par 3 en l'espace de 40 ans (CNES, 2005). Selon le CNES (2005), elle est passée de 1500m<sup>3</sup> en 1962 à 500m<sup>3</sup> en 2003 et à 361m<sup>3</sup> en 2004 (2), elle sera selon les prévisions de 430m<sup>3</sup> en 2030. L'Algérie a connu au cours des 25 dernières années, une sécheresse intense et persistante qui a affecté les régimes des rivières, l'alimentation des nappes aquifères et le niveau de remplissage des réservoirs et des barrages perturbant ainsi l'ensemble des activités socioéconomiques et l'environnement. Cette crise des ressources génère des conflits entre utilisateurs, impliquant les pouvoirs publics dans le règlement des différends. Le droit à l'eau potable est pleinement mis en œuvre pour la très grande majorité des populations des pays industrialisés mais pose problème pour les plus démunis qui ne peuvent plus acquérir un bien indispensable dont le prix a considérablement augmenté depuis une dizaine d'années.

#### **1.3.1 Eaux conventionnelles**

L'Algérie dispose d'une ressource en eau limitée, irrégulière et très inégalement répartie. Cette ressource est fortement tributaire du climat, qui est aride à semi-aride. Les potentialités

hydriques conventionnelles sont estimées à 17.211 milliards de m<sup>3</sup>/an correspondant à 600m<sup>3</sup>/habitant/an, ce qui situe l'Algérie dans la catégorie des pays pauvres en ressources en eau au regard du seuil de rareté fixé par la Banque mondiale à 1000m<sup>3</sup>/habitant/an.

Par rapport à ce potentiel, le seuil maximum de mobilisation est de 10 milliards de m<sup>3</sup> compte tenu des contraintes technico-économiques liées aux sites de barrages. La région littorale du Nord, qui regroupe les bassins méditerranéens et ne représente que 7% de la surface du territoire national, recèle 90% du total des écoulements superficiels du pays et plus de la moitié des eaux souterraines renouvelables (Benblidia et Thivet, 2010).

Parmi ces ressources, seulement 75% sont renouvelables (60% pour les eaux de surface et 15% pour les eaux souterraines). Le volume total des eaux renouvelables est évalué à 15 milliards de mètres cubes, composé de 12,4 milliards de mètres cubes d'eaux superficielles et le reste en eaux souterraines. Les ressources non renouvelables (plus de 40000 milliards de m<sup>3</sup>) concernent les nappes du Sahara septentrional qui seraient exploitées comme des gisements. (Yessad, 2012).

A cet état de fait naturel, la situation actuelle en Algérie est encore exacerbée par plusieurs contraintes, selon Saidi (2005), les plus importantes sont :

- 1) Un déséquilibre entre les besoins et les ressources disponibles : la croissance démographique et le développement économique et social du pays ont induit durant les deux décennies écoulées, un accroissement considérable des besoins en eau potable, industrielle et agricole. Selon Benblidia (2011), le pays atteindra la limite maximale de son potentiel hydraulique avant 2050, vu le rythme de croissance de la demande. Cet auteur note que la demande globale a quadruplé durant les quatre dernières décennies (depuis 1970), à cause d'une croissance très forte de la demande en eau potable, notamment urbaine, au détriment de l'agriculture.
- 2) Les besoins en eau exprimés par les différents usagers sont nettement supérieurs aux ressources en eau mobilisées ce qui engendre des conflits d'affectation et nécessite parfois des arbitrages difficiles ;
- 3) Un déséquilibre géographique entre les besoins et les ressources : la forte concentration des besoins en eau sur la bande littorale (60%) oblige à une réaffectation, par des transferts de ressources en eau assez coûteux financièrement, pour équilibrer les déficits des régions intérieures du pays, notamment toute la zone des Hauts Plateaux ;
- 4) La pollution des nappes et des ressources superficielles : les rejets domestiques, industriels et agricoles dépassent de loin les capacités des systèmes d'épuration, ce qui réduit considérablement les volumes d'eau susceptibles d'être utilisés ;

5) Risque de rupture d'un développement durable : de sérieux problèmes apparaissent dans les prélèvements effectués dans les nappes souterraines qui dépassent les limites de renouvellement des ressources naturelles et nécessitent de puiser dans les réserves non renouvelables.

Outre cela, la faiblesse de ces ressources est encore aggravée par :

- La mauvaise répartition spatiale de ces ressources et l'irrégularité temporelle des écoulements hydriques ;
- L'érosion des sols et l'envasement des barrages ;
- Les pertes dues à la vétusté des réseaux de distribution ;
- L'insuffisance des infrastructures existantes malgré les investissements importants consentis par le pays ;
- Les coûts sans cesse importants des investissements nécessaires à la mobilisation et au transfert des ressources en eau ;
- L'insuffisance dans la gestion des équipements (Saidi, 2005)

Après ce constat, le gouvernement algérien a pris des mesures importantes pour sortir de la situation de pénurie d'eau qui touchait le pays. La question hydraulique a été placée en priorité sur l'agenda politique et de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles (Mozas et Ghosn, 2013).

### **1.3.2 Eaux non conventionnelles**

La réutilisation des eaux usées épurées (REUE) permet d'exploiter une ressource additionnelle non négligeable. Elle permet d'économiser les ressources en eaux conventionnelles, de protéger le milieu récepteur, d'atténuer l'impact de la sécheresse et de fournir des quantités supplémentaires d'eau en accélérant le cycle d'épuration. C'est une option à développer pour pallier au problème de manque d'eau, avant de recourir à d'autres méthodes de production d'eau supplémentaire probablement plus coûteuses.

La réutilisation des eaux usées épurées est une pratique courante dans les régions du monde affectées par des pénuries, car elle présente l'avantage d'atténuer la pression sur les ressources conventionnelles. Cet avantage est renforcé par des objectifs de protection du milieu récepteur, de l'environnement en réduisant le volume des eaux usées déversées dans les oueds, dans le littoral et dans le milieu naturel.

En Algérie, la réutilisation des eaux usées traitées est délaissée en raison de l'état défectueux du parc de stations d'épuration. Actuellement, même si la REUE est devenue un axe important de la nouvelle politique de l'eau, le taux de réutilisation demeure très faible et se limite seulement au domaine agricole à quelques exceptions. En effet, le potentiel actuel de la REUE des STEP (Station d'épuration) en exploitation gérées par l'ONA (Office Nationale de

l'Assainissement) est estimé à 20%, la réutilisation à l'échelle nationale ne se fait actuellement que sur une superficie de 7512ha dans des domaines agricoles (ONA, 2011) bien qu'elle permette une économie de la ressource, ainsi que l'accroissement des superficies irriguées et l'augmentation de la production agricole.

Dans la nouvelle politique de l'eau, la réutilisation des eaux usées épurées est devenue un axe prioritaire, des investissements ont été consentis dans la réhabilitation des anciennes stations et dans la construction de nouvelles. Etant donnée la situation de stress hydrique, les pouvoirs publics ont vu dans cette opportunité un moyen de réduire et de préserver les ressources en eaux conventionnelles tout en accroissant la production agricole.

L'utilisation des eaux traitées peut bénéficier également aux municipalités (espaces verts, lavage des rues, lutte contre les incendies, etc.), aux industries (refroidissement) et au renouvellement des nappes (protection contre l'intrusion des biseaux salés en bord de mer) et permet de lutter contre la pollution des ressources (oueds, barrages, nappes phréatiques, etc.).

L'objectif déclaré par les autorités est de comptabiliser 239 stations d'épuration des eaux usées (STEP) en 2014 correspondant à une capacité de 1,2 milliards de m<sup>3</sup> par an d'eaux épurées. Le recours croissant à cette ressource d'eau non conventionnelle constitue une incitation supplémentaire à l'amélioration des capacités d'épuration des eaux usées et d'augmenter le taux de raccordement des particuliers au réseau d'assainissement. Les priorités pour les autorités portent sur la définition précise des usages de cette ressource, sur la capacité des STEP et du réseau de transport d'eau épurée, et sur l'acceptation par les usagers de réutiliser des eaux usées traitées.

Les questions relatives au traitement et à la réutilisation des eaux usées sont en prise directe avec celles du développement durable et indiquent que les enjeux autour de la qualité et de la quantité des ressources en eau sont liés entre eux, puisque les rejets (nitrates, phosphates, etc.) dans l'environnement entraineront plus tard des coûts non négligeables dans le traitement de l'eau potable.

#### **1.4 L'eau du secteur agricole, Vers une rationalisation de l'usage de l'eau agricole**

Les trois enjeux de l'eau agricole :

- Sécuriser l'agriculture face à une volatilité des ressources en eau ;
- Améliorer l'efficacité des systèmes de distribution de l'eau ;
- Reconversion de l'irrigation gravitaire vers l'irrigation localisée.

Sur les 8.5 millions d'hectares de surface agricole utile (SAU), 3.6 millions d'hectares dépendent de l'irrigation. Les ressources en eau mobilisables pour l'agriculture ne permettent pourtant d'irriguer en moyenne et par an qu'entre 900000 et un million d'hectare (Mozas et



Ghosn, 2013). Depuis que les besoins de la population en eau potable ont été couverts, l'objectif pour les autorités algériennes est de s'attaquer à couvrir au mieux ceux de l'agriculture afin que la consommation totale ne dépende plus autant des importations. Pour aller dans ce sens, le MRE (Ministère des Ressources en Eau) a renforcé sa coopération avec le ministère de l'agriculture et du développement rural.

Tandis que le secteur agricole est celui qui consomme le plus d'eau avec 62% de la demande globale en ressources hydriques (Akli, 2015), la population, les industries et les cultures pérennes demeurent prioritaires par rapport aux récoltes annuelles maraîchères, dépendantes quant à elles de la pluviométrie, dans la répartition sectorielle annuelle. Celle-ci, loin d'être décidée au niveau local en fonction des besoins des irrigants, elle s'établit au niveau national en fixant des quotas au sein d'une commission interministérielle. Quant à l'ONID, l'agence chargée de gérer les ressources en eau de l'agriculture, sa marge de manœuvre est réduite puisqu'elle ne parvient pas à bénéficier d'une autonomie financière suffisante compte tenu de la faiblesse des tarifs de l'eau agricole.

En vue d'agir sur la consommation de l'eau agricole, les ministères des ressources en eau et de l'Agriculture pilotent la reconversion du secteur agricole vers des systèmes d'irrigation économiseurs en eau. Ils ont commencé à fournir gratuitement des équipements économes en eau à hauteur de 260000 dinar/ha aux agriculteurs. Le résultat est plus que satisfaisant puisque les surfaces irriguées en gravitaire traditionnel, où les pertes par évaporation et infiltration sont très élevées, représentaient 85 à 90% en 2000, ce pourcentage est descendu à 63% en 2010 (Akli, 2015).

Dans les années 2000, seulement 40% des besoins en eau agricole étaient satisfaits : le volume disponible en eau était inférieur à 200 millions de m<sup>3</sup> pour des besoins avoisinants les 500 millions de m<sup>3</sup> à raison de 5 000m<sup>3</sup>/ha/an. Si les surfaces irriguées ont presque triplé depuis, le pourcentage de non-couverture des besoins en eau reste similaire, en raison notamment des gaspillages des systèmes de distribution et d'utilisation de l'eau.

## **Chapitre 2**

# **Besoins en eau des cultures**

## 2.1 Introduction

A l'instar de beaucoup de pays dans le monde, l'Algérie est aussi concernée par le problème de l'eau, étant donné que ses ressources se raréfient de plus en plus, aussi du fait qu'elles sont limitées, elles sont sensibles aux aléas climatiques et se caractérisent par une grande disparité géographique. L'essor de l'agriculture irriguée, la croissance démographique, ainsi que le développement à la fois industriel et urbain y exercent une énorme pression. Par ailleurs, la distribution de l'eau potable en milieu rural connaît un important déficit.

L'irrigation est le principal consommateur d'eau en Algérie (62% des eaux mobilisées vont à l'agriculture) (Mozas et Ghosn, 2013). Et comme plus de la moitié des terres cultivables se trouvent dans des zones à faible pluviométrie, ceci ne permet qu'un système de culture précaire, essentiellement basé sur l'alternance céréales/jachère (Mozas et Ghosn, 2013). D'où la nécessité d'une gestion rigoureuse et rationnelle de cette ressource, notamment en agriculture. Parmi les solutions préconisées, figure le pilotage de la demande qui consiste à optimiser les apports en tenant compte des besoins réels de la culture lors de son développement et en fonction des contraintes de l'environnement.

Faciliter la gestion et la programmation des irrigations, en améliorant sa rentabilité, assure une consommation plus rationnelle de l'eau. L'expression programmation de l'irrigation décrit la procédure par laquelle un agriculteur détermine la périodicité et le dosage des applications d'eau. Lorsque l'irrigation est programmée, deux questions se posent : quand faut-il irriguer et quelle quantité sera utilisée ? Pour cela, la connaissance des facteurs climatiques et édaphiques, ainsi que des conditions agronomiques d'exploitation des parcelles agricoles (stades phénologiques et critiques) est souhaitable.

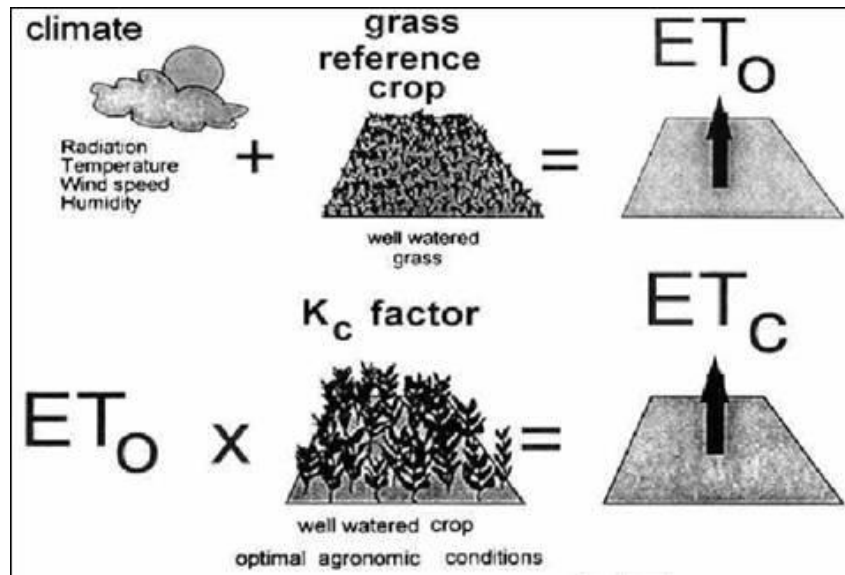
## 2.2 Définition et modélisation

Evaluer les besoins en eau des cultures vise en réalité à quantifier les pertes en eau. Après chaque irrigation, une grande partie de l'eau pénétrant dans le sol est absorbée par les racines, puis remonte vers les feuilles pour être évacuée sous forme de vapeur dans l'air via les stomates, ce phénomène est appelé transpiration végétale.

La quantité d'eau perdue n'est pas représentée que par la transpiration végétale, au niveau des champs, étant donné que le sol possède sa propre évaporation, l'ensemble de ces pertes constituant l'évapotranspiration.

Selon la définition donnée par la FAO-56, le besoin en eau d'une culture est "la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production

sous les conditions considérées" (Allen et al., 1998). Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture ( $ET_c$ ) qui dépend de la demande climatique ou de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) et du coefficient cultural ( $K_c$ ). La figure suivante schématise le processus de l'évapotranspiration par la méthode FAO-56 (Allen et al., 1998).



**Figure 10.** Schéma de calcul des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration maximale  $ET_c$  selon la méthode de la FAO- 56 (Allen et al., 1998).

Les méthodes de détermination des besoins en eau des cultures, s'orientent souvent, soit vers des approches expérimentales (méthodes dites directes), soit vers des approches basées sur des modèles (méthodes dites indirectes) (Er-Raki, 2007).

La méthode du bilan hydrique (Damagnez, 1968; Katerji and Hallair, 1984; Palomo et al., 2002), la méthode lysimétrique (Ducrocq, 1987 ; Marek et al., 1988) ainsi que les méthodes microclimatiques basées sur le bilan d'énergie de la surface du couvert végétal (rapport de Bowen, méthode des corrélations turbulentes ou méthodes aérodynamiques) sont considérées comme étant des méthodes directes. Leur maîtrise nécessite toutefois un équipement de haute technologie très coûteux et une connaissance technique. Dans ce sens, de nombreuses techniques ont été développées au cours des dernières années pour mesurer la perte en eau par évapotranspiration ou par transpiration (Er-Raki, 2007). Parmi ces dernières figurent la technique de flux de la sève (Sakuratani, 1981; Granier, 1985, 1987 ; Edwards et al., 1996; Burgess et al., 2001; Fernández et al., 2001) qui permet de mesurer seulement la transpiration de la plante et la méthode d'eddy-covariance (Running et al., 1999) qui mesure l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle. A l'échelle régionale, l'évapotranspiration peut être évaluée par la scintillation en utilisant le scintillomètre micro-onde (Green et al., 2000).

La méthode indirecte la plus utilisée est l'approche climatique basée sur la méthode FAO-56 (Er-Raki, 2007), dont le modèle est le suivant :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{Equation 1}$$

Où  $ET_0$  représente l'évapotranspiration d'une surface étendue de gazon bien alimentée en eau, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine période de croissance, couvrant complètement le sol et ne souffrant pas de stress hydrique (Allen et al., 1998).  $K_c$  correspond au coefficient cultural, dépendant du type de la culture et de son stade végétatif.

Il est très difficile de respecter les conditions standards pour le calcul de  $ET_0$  (Er-Raki, 2007), de ce fait, différentes formules empiriques ont été développées pour estimer  $ET_0$ . Ces formules empiriques sont classées en trois groupes : les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de rayonnement (Priestly and Taylor, 1972) et les méthodes combinées (Allen et al., 1998). Leur utilisation nécessite la connaissance de plusieurs paramètres dont le type de climat et la disponibilité des paramètres nécessaires. L'utilisation de formules empiriques non adéquates peut surestimer ou sous-estimer les besoins en eau des cultures (Kashyap and Panda, 2001; Droogers and Allen, 2002).

D'autres modèles de type SVAT « Soil-Végétation-Atmosphère-Transfert » ou SiSPAT « Simple-Soil-Plant-Atmosphère-Transfert » plus compliqués que le modèle FAO-56 ont été développés afin de simuler l'évapotranspiration, ou dans certains cas ses composantes (évaporation du sol et la transpiration de la plante) (Oliosio et al., 1999; Boulet et al., 2000), (Braud et al., 1995). Ces modèles de transfert sol-végétation-atmosphère permettent de quantifier les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère et par conséquent de mieux connaître les besoins en eau des cultures. Comme le modèle FAO-56 à coefficient cultural double, il permet le calcul séparé de l'évaporation du sol et de la transpiration de la végétation. Cependant, ces modèles nécessitent la connaissance d'un nombre important de variables, ce qui, actuellement, rend difficile leur utilisation au niveau régionale (Er-Raki, 2007).

Il existe d'autres modèles spécifique (ou monospécifique) ou parcellaires relevant en général de modèles d'écosystèmes naturels ou agronomiques. Les STICS (Brisson et al., 1998), CERRES (Ritchie, 1986) et SUCROS87 (Spitters et al., 1989) faisant partie intégrante de ces derniers. Leur utilisation demeure tributaire de quatre catégories de données d'entrée, à savoir : les données climatiques, les données pédologiques, les itinéraires techniques et les caractéristiques variétales.

C'est grâce aux observations sur le terrain que l'on devra valider le développement des modèles physiques permettant la description des processus de transfert d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère.

Afin d'apporter de l'aide aux décideurs pour la gestion et pour la programmation des irrigations à l'échelle parcellaire, il faudrait disposer de modèles réalistes permettant de quantifier les besoins en eau des cultures.

Si les décideurs voudraient gérer les ressources en eau à l'échelle régionale au lieu de l'échelle parcellaire, l'on fera face à des problèmes majeurs rencontrés dont la variabilité des paramètres du modèle. D'où l'intérêt de la télédétection spatiale qui permet d'extrapoler les informations locales à l'échelle spatiale (Er-Raki, 2007).

### 2.3 Le modèle FAO-56

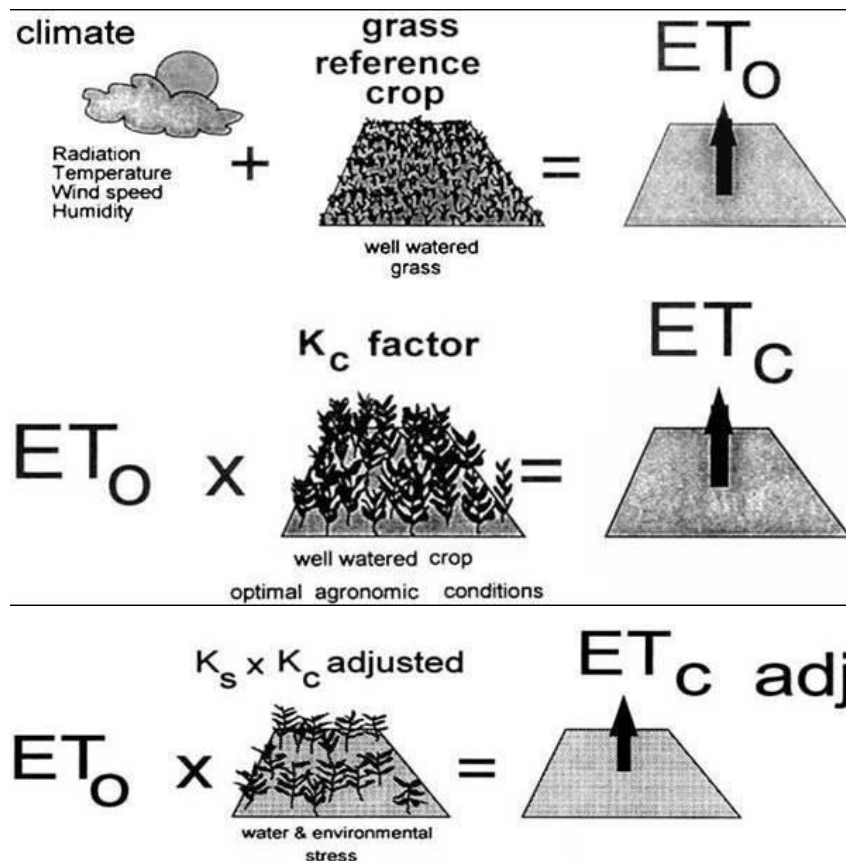
Le modèle FAO-56 (Allen et al., 1998) se base sur l'évapotranspiration de référence et les coefficients culturaux afin d'estimer les besoins en eau des cultures. Ce modèle, se distingue par trois types d'évapotranspiration selon les conditions climatiques et selon le type de la culture comme l'indique la figure 11 :

- La première constitue l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  qui représente l'ensemble des pertes d'eau par évaporation et par transpiration d'une surface étendue de gazon bien alimentée en eau, dont la hauteur est uniforme, est de 8 à 15 cm, en pleine période de croissance, couvrant intégralement le sol.
- La deuxième représente l'évapotranspiration maximale, qui est définie pour différents stades de développement d'une culture donnée sous des conditions agronomiques optimales (sans stress hydrique, sans stress nutritionnel et sans maladie). Elle est reliée à  $ET_0$  par un coefficient cultural  $K_c$  qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée, il est exprimé par :

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad \text{Equation 2}$$

- L'évapotranspiration sous des conditions non standards ou  $ET_{c-adj}$  devient évapotranspiration réelle (ETR) qui est définie comme la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et transpirées par la végétation à un stade de développement physiologique donné et à un état sanitaire réelle. ETR est reliée aussi à  $ET_c$  par un coefficient  $K_s$  appelé coefficient de stress hydrique, ainsi :

$$ETR = K_s * ET_c = K_s * K_c * ET_0 \quad \text{Equation 3}$$



**Figure 11.** Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 :

Evapotranspiration de référence ( $ET_0$ ), évapotranspiration sous les conditions standards ( $ET_c$ ) et évapotranspiration sous les conditions réelles ( $ET_{c-adj}$ ) (Allen et al., 1998).

Il est nécessaire de déterminer trois paramètres pour aboutir à l'évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration réelle, à savoir : l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  ; le coefficient cultural  $K_c$  et le coefficient de stress hydrique  $K_s$ .

### 2.3.1 L'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ )

Afin d'étudier la demande évaporative de l'atmosphère indépendamment du type du couvert végétal et des pratiques de gestion, le concept de l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  a été introduit (Er-Raki, 2007).

Il est très difficile de respecter les conditions standards pour le calcul d' $ET_0$  (Er-Raki, 2007), de ce fait, des méthodes empiriques ont été développées pour estimer l'évapotranspiration de référence, elles sont basées sur différentes variables climatiques, dont on peut citer les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de radiation (Priestly and Taylor, 1972) et les méthodes combinées (Allen et al. 1998). La plupart de ces relations sont testées pour des cultures et des zones particulières. Cependant, elles nécessitent des ajustements pour leur extrapolation à d'autres conditions climatiques et pour

qu'elles soient adaptées aux conditions locales. A titre d'exemple, Blaney and Criddle (1950) proposent une relation pour des régions arides et semi-arides qui donne de bonnes estimations de l'évapotranspiration. Mais elle a tendance à surestimer l'évapotranspiration pour des climats humides.

### 2.3.2 Le coefficient cultural ( $K_c$ )

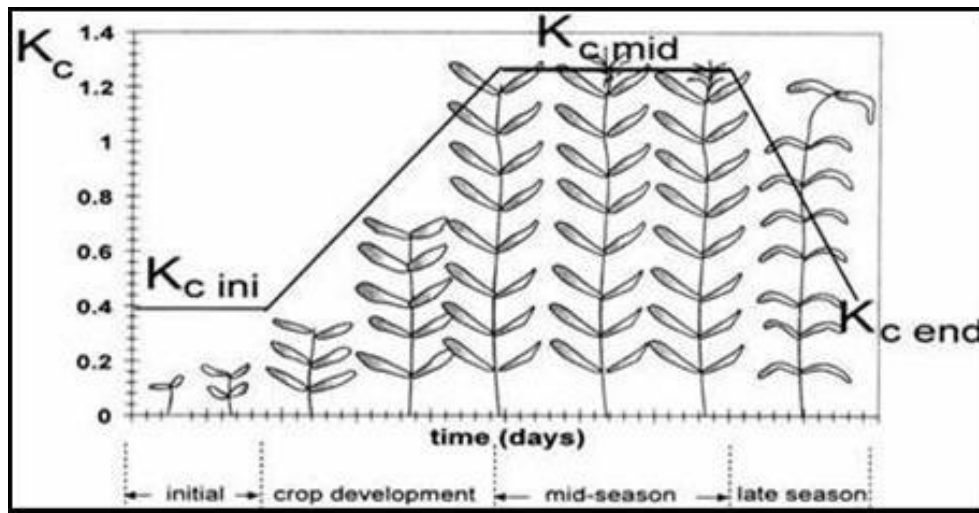
Il représente le rapport entre l'évapotranspiration maximale ( $ET_c$ ) et l'évapotranspiration de référence  $ET_0$  (Allen et al., 1998). Selon le modèle FAO-56, on admet deux approches permettant la détermination de ce coefficient : la première à coefficient cultural simple, la deuxième à coefficient cultural double. Dans la première approche, le coefficient cultural simple  $K_c$  regroupe l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. Dans la deuxième approche,  $K_c$  se distingue en deux termes :

- $K_e$  qui tient compte uniquement de l'évaporation du sol ;
- $K_{cb}$  qui tient compte de la transpiration de la plante.

Le paramètre  $K_c$  dépend de plusieurs facteurs : les facteurs biologiques liés à la sénescence et à la croissance des feuilles, les facteurs physiques liés essentiellement à l'évaporation du sol, les facteurs aérodynamiques liés à la hauteur et à la consistance de la végétation, les facteurs physiologiques liés à la réponse des stomates, à la pression de vapeur saturante et aux facteurs agronomiques liés aux pratiques culturales (système d'irrigation, fréquence des pluies et d'irrigation...).

Les valeurs de  $K_c$  publiées par la FAO-56 (Allen et al., 1998) sont souvent exprimées par culture, en tenant compte des différentes phases de croissance. Le cycle culturale est souvent subdivisé en quatre phases de croissance distinctes : (1) la phase initiale « lini », qui s'étend du semis à environ 10% de la couverture du sol, (2) la phase de développement du couvert végétal « ldev » se terminant au moment où la couverture du sol est complète, (3) la phase mi-saison « lmid » de durée qui se termine par le début de la chute ou la sénescence du couvert foliaire, et (4) la phase de l'arrière-saison ou de maturation « lend ». La figure suivante met en évidence une courbe représentative de l'évolution d'un coefficient cultural simple.





**Figure 12.** Courbe représentative du coefficient cultural simple (Allen et al., 1998)

La valeur du  $K_c$  est considérée comme constante durant les deux phases, l'initiale et la mi-saison, où le sol est prédominant durant la première et où la couverture du sol par la culture est maximale pendant la deuxième. Les valeurs du  $K_c$  pendant les autres phases de croissance (2 et 4) sont obtenues par interpolation. La connaissance des valeurs du coefficient cultural de la phase initiale ( $K_{c\ ini}$ ), de la phase de mi-saison ( $K_{c\ mid}$ ) et de la phase de la récolte ( $K_{c\ end}$ ) d'une part, ainsi que les durées des périodes de croissance, d'autre part, permet d'obtenir pour une culture considérée la valeur du  $K_c$  pour toute la durée du cycle.

### 2.3.2.1 Approche à coefficient cultural simple

Cette approche se caractérise par la combinaison en un seul coefficient l'effet de la transpiration de la plante et l'effet de l'évaporation du sol. Le calcul de l'évapotranspiration maximale  $ET_c$  consiste à :

L'identification des phases de croissance de la culture et des durées correspondantes, ainsi que la sélection des coefficients culturaux correspondants ;

L'ajustement des coefficients culturaux pour les conditions climatiques durant les mêmes phases de croissance (Allen et al., 1998) ;

L'élaboration de la courbe du coefficient cultural  $K_c$  ;

Le calcul de l' $ET_c$  comme étant le produit d' $ET_0$  par  $K_c$ .

### 2.3.2.2 Approche à coefficient cultural double

Cette approche se base sur la division du coefficient cultural  $K_c$  en deux : Un pour la transpiration ( $K_{cb}$ ) appelé coefficient cultural de base, la deuxième pour l'évaporation du sol  $K_e$  appelé coefficient d'évaporation (Allen et al., 1998) :

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) * ET_0 \quad \text{Equation 4}$$

L'approche du coefficient cultural double nécessite plus de données et de calcul par rapport à l'approche simple. Les deux paramètres  $K_{cb}$ ,  $K_e$  sont nécessaires pour déterminer l'évapotranspiration maximale (Allen et al., 1998) .

#### 2.3.2.2.1 Coefficient cultural de base, $K_{cb}$

Ce coefficient représente le rapport entre  $ET_c$  et  $ET_0$  lorsque la surface du sol est sèche et la culture est dans des conditions optimales (absence du stress hydrique). La procédure de sa détermination est exactement similaire à celle du calcul du coefficient cultural simple (Allen et al., 1998).

#### 2.3.2.2.2 Coefficient d'évaporation du sol, $K_e$

Le coefficient d'évaporation du sol  $K_e$  décrit la composante évaporation d' $ET_c$  (Er-Raki et al., 2007), Quand la surface du sol est mouillée, le coefficient d'évaporation  $K_e$  est maximal, quand le sol est sec  $K_e$  est faible et tend à zéro.

L'évaporation de l'eau du sol exposé à la radiation ou sous un couvert végétal, dépend de la quantité d'énergie disponible à la surface du sol. L'évaporation du sol est ainsi limitée par la fraction du sol exposée et mouillée qui, par son effet d'ombre sur le sol, intercepte la radiation solaire. Sous ces conditions,  $K_e$  est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998):

$$K_e = K_r * (K_{cmax} - K_{cb}) < few.K_{cmax} \quad \text{Equation 5}$$

Avec :

$K_{cmax}$  : Valeur maximale de  $K_c$  obtenue après une pluie ou une irrigation ;

$K_r$  : Coefficient de réduction de l'évaporation du sol ;

few : Surface du sol exposée et mouillée.

Le calcul de  $K_e$  passe par la détermination de trois paramètres :

1- La limite supérieure  $K_{cmax}$

La limite supérieure de l'évaporation et de la transpiration d'une culture donnée est représentée par  $K_{cmax}$ . Quand le sol est humide, le coefficient cultural  $K_c$  ne peut jamais dépasser cette valeur maximale  $K_{cmax}$ , l'évaporation du sol est maximale, elle varie selon le climat et le type de surface de référence.  $K_{cmax}$  est donné par (Allen et al., 1998) :

$$K_{c \max} = \max \left[ \left( 1.2 + [0.04 (u_2 - 2) - 0.004 (R_{h \min} - 45)] \left( \frac{h}{3} \right)^{0.3} \right), (K_{cb} + 0.05) \right] \quad \text{Equation 6}$$

Où :

$u_2$  : Vitesse du vent à 2m de hauteur ;

$R_{h \min}$  : Humidité relative minimale ;

$h$  : hauteur de la végétation.

2- Le coefficient de réduction de l'évaporation du sol  $K_r$

Quand la surface du sol est humide,  $K_r$  est égal à 1, dès que la surface commence à sécher,  $K_r$  décroît jusqu'à s'annuler.  $K_r$  est donné par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad \text{pour } D_{e,i-1} \geq REW \quad \text{Equation 7}$$

Où

$D_{e,i-1}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface du sol pour le jour  $i-1$  ;

$TEW$  : Profondeur cumulative maximale de l'évaporation de la surface du sol quand  $K_r = 0$  ;

$REW$  : Eau facilement évaporable.

$TEW$  est donné par l'équation suivante :

$$TEW = 1000(\theta_{fc} - 0.50_{wp})Z_e \quad \text{Equation 8}$$

Où :

$\theta_{fc}$  : Humidité du sol à la capacité au champ [ $m^3 \cdot m^{-3}$ ] ;

$\theta_{wp}$  : Humidité du sol au point de flétrissement [ $m^3 \cdot m^{-3}$ ] ;

$Z_e$  : Profondeur de la surface du sol qui subit l'évaporation [0 - 0.15m].

Le calcul de  $K_r$  nécessite un bilan hydrique au niveau de  $Z_e$  afin de déterminer  $D_{e,i}$  :

$$D_{e,i} = D_{e,i-1}(P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + DP_{e,i} \quad \text{Equation 9}$$

Où :

$D_{e,i-1}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface supérieure du sol exposée et mouillée pendant le jour (i-1) [mm] ;

$D_{e,i}$  : Profondeur cumulative de l'évaporation de la surface supérieure du sol exposée et mouillée pendant la fin du jour  $i$  [mm] ;

$P_i$  : Précipitations pendant le jour  $i$  [mm] ;

$RO_i$  : Ruissellement pendant le jour  $i$  [mm] ;

$I_i$  : Irrigation pendant le jour  $i$  [mm] ;

$E_i$  : Evaporation du sol pendant le jour  $i$  [mm] ;

$DP_{e,i}$  : Percolation de la surface supérieure [mm].

3- La fraction du sol exposée et mouillée  $f_{ew}$  :

Cette fraction est calculée par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad \text{Equation 10}$$

Où :

1-  $f_c$  : Fraction du sol exposée (non couvert par la végétation) [0.01-1] ;

$f_w$  : Fraction du sol mouillée par précipitation ou irrigation. Ce terme dépend du type d'irrigation. Pour une irrigation gravitaire, ce terme vaut 1. Pour l'irrigation localisée,  $f_w$  varie de 0.3 à 0.4 (Er-Raki et al., 2007).

### 2.3.3 Le coefficient du stress hydrique ( $K_s$ )

La procédure de calcul du coefficient du stress est similaire à celle du calcul de l'évaporation du sol (Er-Raki et al., 2007). Il nécessite un bilan hydrique au niveau de la zone racinaire. Il est calculé par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \text{ pour } D_r > RAW; K_s = 1 \text{ pour } D_r < RAW \quad \text{Equation 11}$$

Où :

$D_r$  : Epuisement de l'eau dans la zone racinaire, calculé par un bilan hydrique dans la zone racinaire ;

La fraction d'eau que la plante arrive à extraire de la zone racinaire sans atteindre un stress hydrique est appelée l'eau facilement disponible (RAW). Elle est donnée par :

$$RAW = pTAW \quad \text{Equation 12}$$

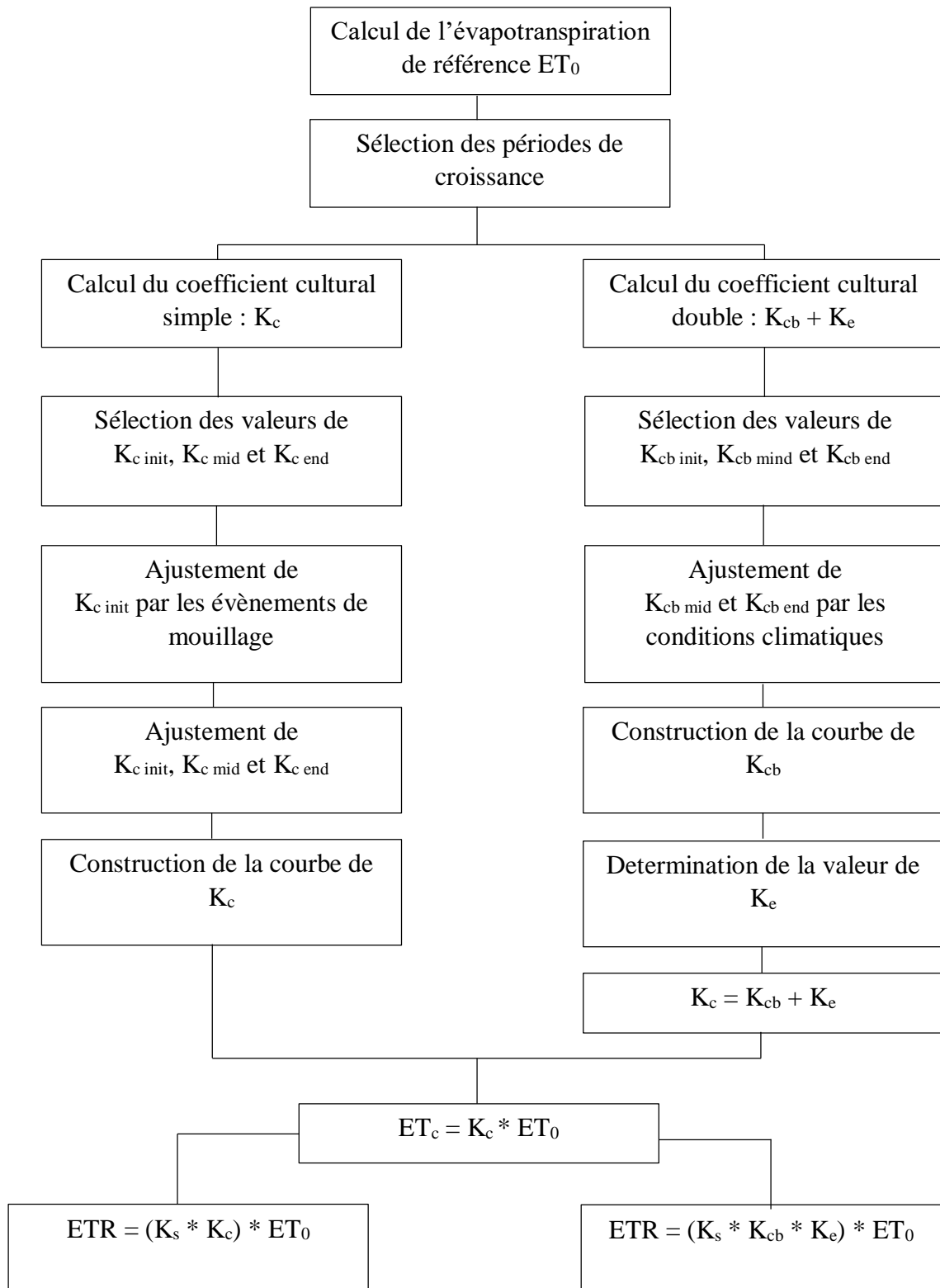
TAW : Elle dépend du type de sol et de la profondeur des racines, elle représente la quantité en eau totale disponible dans la zone racinaire, est donnée par l'équation suivante :

$$TAW = 1000(\theta_{fc} - \theta_{wp})Z_r \quad \text{Equation 13}$$

Où :

$Z_r$  : Profondeur des racines (m) ;

L'organigramme suivant (figure 13) résume la procédure générale de calcul de l' $ET_c$  et ETR :



**Figure 13.** Organigramme de calcul d'évapotranspiration maximale  $ET_c$  et réelle  $ETR$  par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et al., 1998).

## 2.4 Relation $K_{cb}$ -NDVI et $F_c$ -NDVI

Les cultures annuelles, comme le cas du blé par exemple, se distingue par une évolution temporelle de l'indice de végétation (NDVI) qui est similaire au coefficient cultural de base ( $K_{cb}$ ) (Neale et al., 1989; Hunsaker et al., 2005). Au Maroc, une relation entre  $K_{cb}$  et NDVI pour le blé est développée dans le bassin versant du Tensift (Er-Raki et al., 2007) :

$$K_{cb} = 1.07 \left[ 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.84} \right] \quad \text{Equation 14}$$

Avec

NDVI min et NDVI max sont les valeurs minimale et maximale de NDVI relatives au sol nu et au sol dense en végétation en plein développement.

De même une relation entre le taux de couverture  $F_c$  et NDVI a été établie (Er-Raki et al., 2007) :

$$F_c = 1.18 (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad \text{Equation 15}$$

L'accessibilité de ces paramètres par la télédétection, notamment les indices de végétation comme NDVI permet de développer une autre version du modèle FAO-56. Cependant, il doit être testé, calibré et validé à l'aide de données d'observations sur le terrain.

## 2.5 Cas des agrumes

### 2.5.1 Importance des agrumes

De nos jours, leur production dépasse 100 millions de tonnes par, considérés comme étant les fruits les plus consommés dans le monde (Er-Raki et al., 2007). Le bassin méditerranéen produit plus du quart de la production mondiale. L'Espagne, Israël, l'Italie et le Maroc sont les principaux pays exportateurs de la région méditerranéenne (El Hari, 1992).

En Algérie, La culture des agrumes remonte à une époque lointaine. Son développement a pris de l'ampleur à partir du XIV<sup>ème</sup> (14) siècle avec l'arrivée des musulmans d'Andalousie.

L'essor du commerce des produits agrumicoles se situe au XIX<sup>ème</sup> (19) siècle avec le déclin de l'agrumiculture espagnole.

Durant les années soixante (1960), l'Algérie exportait, en moyenne 25% de sa production. La période 1970/80 a connu la réorientation de la production destinée à l'exportation vers la satisfaction de la demande du marché intérieur.

De la fin des années 1980 jusqu'au début des années 2000, l'agrumiculture a connu une régression dont les effets sont : un arrêt du développement, une érosion du savoir-faire due à un délaissement des vergers. Avec l'avènement des différents programmes, dès les années 2000, l'agrumiculture au même titre que les autres filières a bénéficié d'une relance grâce à des

mesures incitatives aussi bien financières, socioéconomiques, technico-scientifiques qu'organisationnelles. Le programme du renouveau de l'économie agricole et rurale vise l'augmentation et l'amélioration qualitative de la production pour la satisfaction des besoins de la population et de l'exportation.

La culture des agrumes représente pour notre pays un segment stratégique. Selon les dernières statistiques (ITAFV, 2011), l'agrumiculture couvre actuellement une superficie totale de : 64323ha, soit environ 8% de la superficie totale occupée par les cultures pérennes. La production totale avoisine les 1 100 000 tonnes.

Le niveau de rendement moyen national enregistré (2010/2011) est de l'ordre de 172 quintaux/ha, bien qu'ayant bénéficié d'une évolution régulière (augmentation de 60 quintaux/ha depuis l'indépendance), il demeure insuffisant au regard des résultats obtenus par certaines agrumiculteurs de différentes régions du pays (de 300 à 400 quintaux/ha et même plus) en mettant en œuvre un itinéraire technique approprié.

### **2.5.2 Cycle végétatif et productif des agrumes**

Les agrumes sont des espèces subtropicales qui se développent dans des zones où le gel est absent. A -3°C, le gel peut affecter dangereusement le feuillage. A -9°C, la charpente est détruite. L'activité de croissance commence à 13°C et se poursuit jusqu'à 36°C. Les agrumes subissent deux périodes de dormance: (1) une dormance d'été qui se produit en jours longs et chauds. (2) une dormance d'hiver survenant en jours courts et froids. Une humidité atmosphérique pendant la saison chaude peut provoquer des attaques de phytophthora. Les vents secs de l'été amplifient la chute des fruits. Les vents, s'ils sont violents provoquent la chute des fruits. Le cycle des agrumes peut se décomposer en six périodes : principales (Praloran, 1971; El Hari, 1992):

- i- La pousse végétative, on trouve trois pousses végétatives chez les agrumes. (1) pousse de printemps, elle débute en fin Février et se termine au début de Mai. Elle est la pousse la plus importante, non seulement par le nombre et la longueur des rameaux émis, mais aussi par le fait qu'elle est la pousse florifère; (2) pousse d'été, elle commence en Juillet et se termine en Août; (3) pousse d'automne, elle débute en Octobre et se termine en fin Novembre. Cette pousse assure le renouvellement des feuilles ;
- ii- La floraison, elle a lieu en printemps (fin Mars, début Mai). Le nombre de fleurs portées par un arbre est très important. il est estimé pour un arbre adulte d'orange à 60000 (Loussert, 1987), mais seulement 1% de ces fleurs donnera des fruits ;
- iii- La pollinisation et la fécondation, ont lieu durant les mois de Mai et Juin ;

- iv-La nouaison, elle vient après la fécondation. C'est la première étape du développement des fruits ;
- v- Le grossissement du fruit est très rapide après sa nouaison, il dépend de l'âge de l'arbre, des conditions climatiques et de l'alimentation hydrique ;
- vi-La maturité, le fruit atteint son calibre final en Octobre, après une continuité de grossissement pendant Juillet- Août –Septembre, la maturité est marquée par un changement de couleur et par la qualité de la teneur en jus de sa pulpe.

Tenant compte de l'importance économique de l'agriculture en Algérie, et les contraintes qui limitent une meilleure production, il est nécessaire de développer des techniques agricoles qui permettent d'utiliser au mieux les faibles ressources en eau disponibles pour une amélioration et une stabilisation de la production. Dans ce sens, une gestion rationnelle et rigoureuse de l'eau dans le domaine agricole s'impose. Une des premières solutions pour économiser l'eau dans ce domaine consiste à optimiser les apports en fonction des besoins réels de la culture. La connaissance des besoins en eau des cultures ou de l'évapotranspiration est essentielle dans la planification et l'aménagement des ressources hydriques.

## **2.6 Apport de la télédétection spatiale dans l'estimation des besoins en eau des cultures**

La télédétection permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci, par l'acquisition d'images satellitaires. Elle englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information dans plusieurs domaines : météorologie, climatologie, océanographie, hydrologie, agriculture...etc.

La télédétection dans le domaine thermique permet d'estimer la température de la surface qui varie fortement en fonction de l'environnement microclimatique des feuilles et de l'état d'alimentation hydrique de la plante (Jackson, 1985; Laguarde and Choissnel, 1989).

Dans le domaine agricole, la télédétection spatiale peut être un outil important pour la surveillance de l'état des cultures à différentes échelles d'espace (haute résolution SPOT, LandSat, basse résolution NOAA).

Dans le domaine de la gestion de l'eau, beaucoup de travaux utilisant la télédétection spatiale ont été développés pour une meilleure planification de l'eau d'irrigation (Carlson and Buffum, 1989; Chanzy, 1991; Moran et al., 1997; Luquet, 2002). Plusieurs méthodes ont été développées pour exploiter l'information issue de la télédétection infrarouge thermique dans le but d'estimer l'état hydrique d'une culture, dans ce sens, plusieurs indicateurs de stress ont été développés : SDD (Stress Degree Day, Idso et al., 1977), CT (Canopy Temperature, Berliner et al., 1984),



CWSI (Crop Water Stress Index, Jackson et al., 1981), WDI (Water Déficit Index, Moran et al., 1994; Luquet, 2002).

La télédétection permet d'avoir des informations continues sur l'état végétatif par le biais des indices de végétation. L'indice le plus répandu et le plus utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ce dernier est défini par le rapport de la différence entre les réflectances de surface dans les domaines proche infrarouge et le rouge sur la somme de celles-ci (Rouse et al., 1974; Jackson, 1983). Cependant dans les zones arides et semi-arides, la végétation étant éparse, le sol affecte considérablement le NDVI (Huete, 1988), d'où l'intérêt de développer un autre indice de végétation indépendant des effets de la brillance du sol (SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index).

Des études théoriques et expérimentales ont montré que les indices de végétation peuvent être reliés simplement aux caractéristiques de la végétation, notamment l'indice foliaire (LAI), le coefficient cultural ( $K_c$ ) et la couverture végétale (Heilman et al., 1982 ; Asrar et al., 1984; Choudhury et al., 1994 ; Purevdorj et al., 1998 ; Garatuza and Watts, 2005 ; Duchemin et al., 2006 ; Er-Raki et al., 2007).

A l'échelle régionale, la similitude entre l'évolution de l'indice de végétation (NDVI) au cours du cycle d'une culture et celle du coefficient cultural a encouragé les scientifiques à chercher des relations entre ces deux paramètres afin d'estimer les besoins en eau des cultures (Heilman et al., 1982; Neal et al., 1989; Jackson et al., 1980). Plusieurs études ont montré qu'il existe une relation linéaire entre les deux paramètres (Choudhury et al., 1994; Jackson et al., 1980). Cependant cette relation peut être perturbée par l'évaporation du sol (Allen and Tasumi, 2003). Pour cette raison, plusieurs auteurs ont essayé de chercher des relations entre les indices de végétation et le coefficient de transpiration des plantes  $K_{cb}$ .

Un autre paramètre très important dans l'estimation des besoins en eau est l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ). La spatialisation de ce terme est très importante pour la gestion de l'eau d'irrigation à grande échelle. Ce qui fait que beaucoup de travaux basés sur la télédétection ont été développés pour son estimation (Reginato et al., 1985; Stefano and Ferro, 1997; Stewart et al., 1999; Rivas and Caselles, 2004). D'autres travaux utilisent des combinaisons entre les modèles type « Digital Elevation Model » (DEM) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour cartographier  $ET_0$  (Moore, 1996; Srinivasan et al., 1996; Chuanyana et al., 2004), d'autres utilisent les données climatiques spatialisées (Température, Humidité, Vent, Rayonnement global) issues de modèles météorologiques (Er-Raki et al., 2007).

## **Chapitre 3**

# **Utilisation conjonctive des ressources en eau souterraine et non conventionnelle dans un système d'irrigation cogéré**

### 3.1 Introduction

A travers le monde, le volume des eaux usées urbaines est de plus en plus important, ces dernières constituent la solution alternative permettant de combler le manque en eau d'irrigation dans plusieurs pays comme l'Afrique du sud, l'Allemagne, les Etats-Unis, l'Inde, la Tunisie et le Mexique (Niang, 1996). Ainsi, plusieurs pays du bassin méditerranéen tels que la Grèce, Israël, l'Italie et Chypre ont recours à l'utilisation des eaux usées en irrigation (Kalavrouziotis et al., 2015). Les statistiques de la fondation de la population des Nations Unies (UNFPA, 1997) estiment qu'environ 200 millions de m<sup>3</sup>/jour d'eau usée sont déversés et ne sont pas traités à travers le monde. Raschid-Sally et al. (2005) estiment que l'utilisation planifiée des eaux usées dans les pays du Moyen-Orient peut atteindre des taux de 70% de l'eau d'irrigation. Ils mettent en évidence l'utilisation planifiée dans les pays riches et l'utilisation non planifiée des eaux usées dans les pays pauvres. McIntosh (2003) estime que plus de la moitié des populations des pays en développement aient accès à l'eau et n'ont pas accès à l'assainissement, ce qui favorise davantage l'utilisation des eaux usées en agriculture. La variabilité quantitative et qualitative des eaux conventionnelles, ainsi que la fiabilité de l'approvisionnement en eau usée conjugué à une faible utilisation d'engrais permet le recours à l'usage des eaux usées (Nakib et al., 2016 ; Van der Hoek et al., 2002 ; Ensink et al., 2002, 2004 ; Iglesias et Garrote, 2015). Ces dernières, peuvent augmenter l'approvisionnement en eau dans les zones à faible écoulement et améliorer la conservation des ressources naturelles (Agah et al., 2017 ; Elmeddahi et al., 2016 ; Karef et al., 2014), et permet une économie en eau conventionnelle d'environ 20% (Elbana et al., 2010). Le mélange intelligent de différents types de ressource en eaux peut atténuer l'effet négatif de l'eau salée sur les cultures (Naresh et al., 1993).

Les travaux menés par Raschid-Sally et al. (2005) montrent l'intérêt d'irriguer avec les eaux usées, comme le cas du Vietnam où les autorités publiques autorisent l'irrigation des champs de riz par ces eaux. Au Ghana et en Bolivie, les eaux usées se mélangent aux eaux conventionnelles, et sont déversées directement dans les canaux d'irrigation. En Inde, l'utilisation conjuguée des eaux usées et des eaux souterraines est très répandue (Raschid-Sally et al., 2004). Cependant, il existe très peu d'étude sociotechnique sur l'utilisation combinée de l'eau en agriculture (Hamamouche et al., 2017). Alors que, la gestion de la ressource en eau potable à l'échelle locale est décrite par plusieurs auteurs, Bréthaut (2012) évoque comment les Régimes Institutionnels de Ressources (RIR) sont mis en œuvre dans un cadre restreint au tourisme, et comment l'effet de ce facteur peut atteindre l'échelle du bassin versant, à partir des solutions mises en place localement modifiant significativement la perception de la gestion de l'eau. Selon Petitet (2007), le modèle de la gestion déléguée des eaux potables, adopté par les

institutions internationales (Banque mondiale) et l'Union européenne constitue la solution universelle aux problèmes des métropoles. Mahaman (2005) évoque comment la république du Niger a privatisé les entreprises publiques du secteur de l'eau au niveau urbain et au niveau rural. Le secteur agricole reste peu étudié, ce qui nous a menés à s'intéresser de près au cas du périmètre irrigué de Mascara, où la gestion de l'eau d'irrigation pour ses différentes sources (souterraine, épurées et brutes) est confiée aux agriculteurs.

Nous retrouvons ce cas d'étude dans les travaux menés par Hamamouche et al. (2017) dans un milieu oasien, où les agriculteurs combinent différents type de ressources en eau dans l'irrigation, notamment l'eau de surface comme source principale et l'eau souterraine comme source secondaire, dont la gestion de l'irrigation est confiée à la communauté agricole, et qualifiée de gestion cogérée.

Les auteurs (Ostrom, 1990 in Jimmy et al., 2016 ; Ratner et al., 2013 ; Yasmi et al., 2011) définissent les systèmes cogérés et autogérés par le degré d'implication de l'Etat dans la gestion du système de production. Le chapitre suivant s'intéresse à l'impact de l'évolution du système d'irrigation d'un système autogéré où l'implication de l'Etat est minime, vers un autre cogéré-délégué où l'on enregistre une délégation de l'irrigation des instituts publics, aux irrigants, où les agriculteurs associent les 3 types de ressources en eau d'irrigation. Selon Jarousseau et al. (2016) l'enjeu territorial et environnemental conduit les agriculteurs à des adaptations nouvelles, la mise en service de la station d'épuration de Mascara en 1970 a entraîné une nouvelle vision de la gestion des ressources en eau au sein de la communauté agricole du périmètre irrigué de Mascara (El Kour).

En Algérie, l'intéressement à la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation afin de combler le déficit en eau agricole augmente de plus en plus, le ratio entre les superficies irriguées et irrigables est de 0,20 (Hartani et al., 2004). Tandis que le taux annuel des ressources en eau par habitant est réduit de 1500m<sup>3</sup> en 1962 à 500m<sup>3</sup> aujourd'hui (Morgan et al., 2013).

La stratégie adoptée par l'Etat consiste à prioriser l'aspect de la gestion par l'offre, à travers le développement des infrastructures de mobilisation de nouvelles ressources, sans se soucier de la gestion de la demande et son utilisation efficiente à l'échelle de l'utilisateur. Cela est confirmé par la part prépondérante accordée dans les budgets d'investissement pour l'augmentation des capacités de stockage et des grandes infrastructures, face à la faiblesse des financements consacrés à l'amélioration des performances des systèmes de distribution d'eau et d'irrigation (Benslimane et al., 2015). Ajoutant à cela le volume d'eaux usées rejetées à l'échelle nationale, qui est estimé actuellement à près de 750 millions de m<sup>3</sup> et dépassera 1,5 milliards de m<sup>3</sup> à l'horizon 2020. La wilaya de Mascara compte pour elle une superficie

projetée de 900 hectares irrigables à partir de : station d'épuration (STEP) de Mascara, lagune de Ghriss et d'El Hachem (Kessira, 2013).

Le périmètre de Mascara dans la plaine de Ghriss, irrigué par les eaux usées, les eaux de la nappe et ceux de la station d'épuration, fait l'objet d'étude de ce chapitre. L'objectif vise à analyser les effets de la gestion des ressources en eau cogérée-déléguée, des services publics aux usagers, en se basant sur des indicateurs tels que : la typologie agricole de la zone d'étude – l'impact sur la satisfaction en eau d'irrigation – l'impact sur les pratiques culturales (choix des cultures, mode d'irrigation et intrants agricoles utilisés), ainsi nous mettrons le point sur la stratégie socio agricole adoptée par les agriculteurs.

### **3.2 Aperçu sur la gestion de l'eau communautaire**

Dans les années 1960 à 1980, les systèmes irrigués communautaires ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. On peut citer les travaux de Leach (1959) au Sri Lanka (Ceylon), de Geertz (1963) en Indonésie, de Glick (1970) en Espagne. Ces chercheurs étaient fascinés par la pérennité des systèmes irrigués qu'ils observaient et par la capacité des irrigants à développer localement une gestion sophistiquée d'infrastructures simples sans intervention ou contrôle Etatique, alors que les périmètres irrigués modernes connaissaient des difficultés opérationnelles considérables (Coward, 1980b). Suite à cela, les systèmes irrigués communautaires datant de plusieurs siècles tels que les Subaks à Bali, Zanjeras aux Philippines, Kulos au Népal, Huertas en Espagne, Foggaras ou Khetaras dans la région du MENA, ont été compris comme des laboratoires de recherche à ciel ouvert (Meinzen-Dick, 1997). Des recherches ont été menées sur ces différents systèmes dans le but de formuler des principes d'organisation sociale autour de l'eau. L'idée était de produire des principes applicables aux périmètres étatiques, en particulier par la création d'associations d'usagers de l'eau agricole dans le cadre des politiques de gestion participative de l'irrigation (Lam, 1998 ; Mabry, 1996 ; Trawick, 2001). Les paradigmes internationaux de la gestion participative de l'irrigation et celui du transfert de la gestion de l'irrigation, qui concernent surtout la grande hydraulique, sont ainsi en grande partie basés sur l'analyse du fonctionnement des systèmes irrigués communautaires (Kuper, 2011).

Dans un premier temps, les systèmes irrigués communautaires ont été considérés comme un modèle de gestion institutionnelle basée sur l'action collective pour inspirer les systèmes irrigués Etatiques (Coward, 1980b). Dans un deuxième temps, ce sont les capacités de ces systèmes irrigués à surmonter les changements globaux du 21<sup>ème</sup> siècle qui ont été remises en cause. Ces changements sont induits principalement par la mondialisation économique, la

compétition accrue pour les ressources en eau, en particulier les puits et forages individuels et le développement rapide d'une agriculture intensive des systèmes irrigués communautaires. Ce nouveau contexte a impulsé à son tour des recherches sur l'adaptabilité (la capacité d'un système à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en subissant le changement afin de conserver essentiellement la même fonction, la même structure, la même identité et la même rétroaction) et sur la vulnérabilité de ces systèmes irrigués communautaires (Young et al., 2010 ; Cox et Ross, 2011 ; Fernald et al., 2015).

Cependant, l'échec dans la tentative d'adaptation à une perturbation donnée rend le système irrigué communautaire vulnérable et peut entraîner l'effondrement de l'ensemble de l'agrosystème dont dépend la communauté d'irrigants, avec comme conséquence la perte des connaissances locales écologiques, de la culture locale et du patrimoine historique, social et culturel (Pérez et al., 2011).

### **3.2.1 La capacité d'adaptation intrinsèque des systèmes irrigués communautaires : institutions et infrastructures d'irrigation**

Le fonctionnement des systèmes irrigués autogérés repose sur des arrangements institutionnels dont le rôle est d'assurer la gestion, la distribution, le partage, l'usage et la durabilité d'un bien commun (Ostrom, 1992). Les institutions d'irrigation constituent alors un ensemble de règles effectives de distribution et d'utilisation de l'eau, dans un endroit donné (Ostrom, 1992). Ces règles permettent de déterminer qui peut prendre des décisions et sur quelles questions, quelle action est autorisée ou interdite, quelles procédures à suivre et à respecter, quelles sanctions pour quelles infractions, quelles informations doivent ou non être fournies, quels sont les coûts des activités pour les individus, quelles prestations, quels avantages reçoivent ils en échange (Hamamouche et al., 2017). De ce fait, dans des systèmes vieux de plusieurs siècles, les institutions sont la composante la plus importante pour opérer des adaptations (Janssen et al., 2007). Ostrom (1992) souligne que ces institutions doivent avoir un « caractère artisanal » puisqu'elles doivent s'adapter continuellement à la variabilité des contextes économiques, politiques, environnementaux et sociaux. Elles sont influencées par la vie sociale quotidienne tout autant que par leur élaboration historique, par l'interaction entre les arrangements formels et informels, traditionnels et modernes, et par l'ensemble du contexte sociopolitique dans lequel ces institutions prennent place (Cleaver et De Koning, 2015).

Les travaux pionniers sur les systèmes irrigués communautaires s'intéressaient beaucoup aux interactions entre la technique et le social, Coward (1980b) souligne ainsi l'importance de prendre en compte l'environnement physique et hydraulique dans le façonnage des institutions

et les organisations sociales. Les capacités de façonnage des institutions dans les périmètres irrigués communautaires ont quelque peu diminué l'attention accordée à cette dimension physique/hydraulique. Pourtant, les arrangements institutionnels sont influencés par les propriétés physiques des ressources en eau (débit, volume, saison d'écoulement) (Schlager et al., 1994). L'infrastructure d'irrigation est donc une dimension très importante à prendre en compte dans l'étude des systèmes irrigués communautaires.

### **3.2.2 Les vulnérabilités des systèmes irrigués communautaires face à la « modernité »**

Un certain nombre d'études sur les systèmes irrigués communautaires, par exemple le périmètre de Pumpa au Népal (Cifdaloz et al., 2010) montrent que ces systèmes sont certes suffisamment robustes pour s'adapter aux problèmes biophysiques et sociaux par le façonnage d'arrangements institutionnels, mais qu'ils peuvent se montrer vulnérables face à des changements rapides et profonds tels que les interventions étatiques et le développement de l'accès privé à l'eau souterraine. Contrairement aux eaux de surface dont l'appropriation est très clairement réglementée, l'eau souterraine est souvent présentée comme une 'copropriété' non reconnue et sans règlement spontané, accessible au grand nombre par une multitude de puits et forages souvent individuels (Margat, 2008). L'apparition de technologies modernes d'exploitation intensive des eaux souterraines a induit un développement rapide de l'agriculture irriguée au cours de ces quarante dernières années (Margat et Van der Gun, 2013). Ciriacy-Wantrup (1969) soulignait déjà que depuis l'émergence d'une agriculture basée sur le pompage des eaux souterraines, par exemple pendant la révolution verte en Inde, l'accent avait été mis sur les changements technologiques et sur la productivité agricole aux dépens des institutions pour réguler l'accès et l'utilisation de cette ressource naturelle. Ce n'est qu'ultérieurement qu'on a constaté que les niveaux piézométriques baissaient et que les difficultés de certaines catégories d'agriculteurs d'accéder à l'eau souterraine apparaissaient que l'on est revenu sur la nécessité de façonner des institutions pour une meilleure gouvernance des eaux souterraines. Or, dans la littérature, beaucoup d'auteurs décrivent un déclin continu des aquifères exploités sans que les acteurs n'arrivent à en réguler la cadence (Shah, 2009).

Dans un tel contexte d'accès privé à l'eau souterraine, les systèmes irrigués communautaires sont mis en danger à la fois parce que la baisse des niveaux piézométriques peut les priver d'eau dans certains cas et en parallèle parce que certains irrigants se tournent de plus en plus vers l'extérieur de ces systèmes. Un discours pessimiste a donc émergé montrant les vulnérabilités socio-économiques, écologiques et environnementales des systèmes irrigués communautaires face à l'exploitation des eaux souterraines pompées (Fornés et al., 2005). Ce qui menace

l'effondrement des systèmes irrigués anciens (Pérez et al., 2011). Dans des régions arides à semi-arides, comme le pourtour méditerranéen, l'envie de développer une agriculture de marché couplée à la variabilité de la disponibilité des eaux de surface, a rendu l'agriculture irriguée tributaire des eaux souterraines qui sont mobilisées par des milliers de puits et de forages privés (Leduc et al., 2017). Dans les pays du Maghreb, l'engouement pour cette ressource en eau a été soutenu par le développement de technologies de pompage sophistiquées et modernes promu et accompagné, le plus souvent, par des politiques publiques dans le but d'atteindre la sécurité alimentaire de ces pays (Kuper et al., 2016). Face à une agriculture de marché orientée vers la mondialisation économique, plusieurs chercheurs tirent la sonnette d'alarme sur l'utilisation intensive de l'eau souterraine en agriculture qui entraînerait selon eux de graves problèmes à moyen et à long terme (Llamas, 2003 ; Llamas et Martínez-Santos, 2005 ; Margat et Van der Gun, 2013).

D'après Petit et al. (2017) plusieurs indicateurs signalent d'ores et déjà le risque d'un éventuel effondrement social, économique et écologique des écosystèmes tributaires des eaux souterraines. Au-delà des risques inhérents à ces nouvelles formes d'agriculture basées sur les eaux souterraines, l'accès individuel à l'eau pompée met aussi en péril les systèmes irrigués collectifs, Etatiques et communautaires. Schlager (2007) explique cela par le fait qu'une fois qu'un agriculteur obtient un accès privé à l'eau souterraine, il se retire de l'organisation sociale et arrête de contribuer aux tâches collectives telles que l'entretien du réseau d'irrigation. Balasubramanian et Selvaraj (2003) ont montré que l'accès privé à l'eau souterraine en Inde a permis à une grande partie des irrigants de s'affranchir des travaux d'entretien de l'infrastructure d'irrigation et donc de se désintéresser des institutions d'irrigation traditionnelle. Ceci a accentué davantage les relations de pouvoir et les inégalités existantes d'accès à l'eau (Aubriot, 2006a). Par exemple, seuls les propriétaires les plus aisés ont pu investir dans des pompes, utilisant dorénavant leur possibilité d'accéder à l'eau souterraine pour la vendre aux plus pauvres et ainsi maintenir leur pouvoir local (Aubriot, 2006b). Au Maghreb, le développement de nouvelles terres agricoles à partir de la même ressource en eau que celle mobilisée auparavant par les communautés d'irrigants en présence, a créé une concurrence sur la ressource en eau (foggaras) en faveur des exploitations dites modernes, et au détriment des anciennes pratiques d'irrigation (Dubost et Moguedet (1998) en Algérie ; Kassah (1998) en Tunisie ; Lightfoot (1996) au Maroc). Dans le Sahara algérien, ces transformations socio-spatiales, socio-hydrauliques et socioéconomiques ont été favorisées par la libération de l'accès à la propriété foncière et aux ressources en eau souterraine par pompage, au début des années 1980. Parfois, les anciens métayers (khammès) ont saisi cette opportunité économique pour



s'affranchir de la hiérarchie sociale au sein des oasis tout en améliorant leur statut social. Il s'agissait parfois des émigrés de retour avec une certaine capacité d'investissement. Dans d'autres cas, de nouveaux périmètres agricoles ont été mis en place par l'État.

Face à cette perturbation majeure, les communautés des irrigants ont tenté de s'adapter à cette intrusion, et ont intensifié l'exploitation de l'eau souterraine par des puits. De ce fait, les irrigants ont aggravé leurs problèmes (surexploitation de la ressource en eau commune et tarissement des sources) rendant leurs systèmes plus vulnérables à long terme (Hamamouche, 2017).

### 3.3 Matériels et méthodes

#### 3.3.1 Zone d'étude

Le site d'étude fait partie de la plaine de Ghriss, il s'agit d'un périmètre de 450 hectares situé au Sud de la ville de Mascara, ce dernier faisant partie du sous bassin versant de l'oued Fekan. Située dans le Nord-Ouest algérien, entre 35° 07' et 35° 31' de latitude N et entre 0° 0' et 0° 26' de longitude E. La limite Nord de la plaine est distante de la mer Méditerranée de moins de 100 kilomètres et sa limite sud se trouve à une centaine de kilomètres de l'Atlas saharien (figure 14). Ce qui favorise à la fois les influences climatiques méditerranéennes et sahariennes (Bekkoussa et al., 2008).

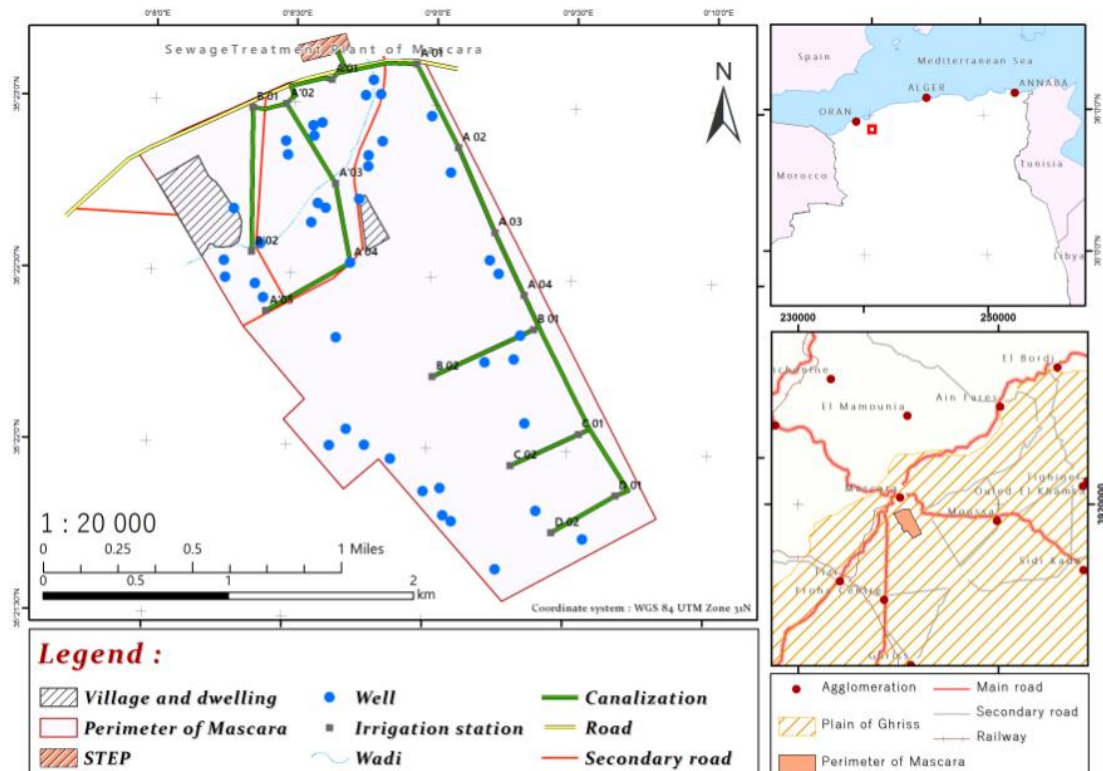


Figure 14. Localisation géographique du périmètre de Mascara

### 3.3.2 Le périmètre irrigué de Mascara, particularité et état des lieux

Durant les années 1960-1970, ce périmètre était destiné exclusivement à la production de tabac, irrigué par les méthodes traditionnelles telles que la submersion et le gravitaire à partir de l'eau de l'oued de Mascara. A partir de la révolution agraire durant la fin des années 1970, le périmètre a connu une expansion massive de cultures maraichères, à leur tête la production de la pomme de terre à une époque où l'eau de la nappe affleurait en surface. Le début des années 1990 est marquée par le démantèlement du système des coopératives instauré par l'Etat durant la révolution agraire, et une diminution des précipitations moyennes annuelles à environ 260mm (Gliz et al., 2015). Cette situation est à l'origine d'un phénomène qu'on peut qualifier d'agriculture cogérée, où les propriétaires terriens louent leurs terres et puits aux agriculteurs locaux par le biais de contrats souvent de longue durée, et la gestion de l'eau provenant de la station d'épuration est confiée aux usagers, tandis que l'ouverture et la fermeture de l'eau est gérée par les services publics.

Cette dernière est acheminée par gravité sur les deux rives de l'oued par des canaux à ciel ouvert, opérant ainsi la distribution. Le partage de l'eau se fait selon la règle élaborée par les agriculteurs en fonction des surfaces à irriguer, et selon le débit acheminé au niveau des canaux, environ une heure par jour est nécessaire pour irriguer un hectare en saison sèche. Les agriculteurs ont recours au mélange de l'eau épurée avec l'eau usée brute quand le débit de l'oued dépasse les capacités de traitement de la station d'épuration.

Cette utilisation des eaux résiduaire depuis plusieurs années, et la rareté croissante des autres ressources fait que l'acceptation socio-culturelle de cette pratique a pris de l'ampleur au sein de la communauté. En 2009, les agriculteurs du périmètre ont participé financièrement à la réalisation du réseau d'irrigation souterrain commun prenant comme source d'eau, l'eau usée épurée de la station d'épuration de la ville de Mascara. Cette eau qui vient en appui à l'eau de la nappe utilisée massivement suit la même règle de partage qui est basée sur les surfaces et les débits relâchés de l'ordre de 10000m<sup>3</sup>/jour.

A défaut de gestion concordante aux pratiques agricoles, les lâchées se font à partir de huit heure du matin jusqu'à 16 heure d'après-midi, l'utilisation de cette ressource reste faible et ne permet pas un soulagement des eaux de la nappe. Pour cela un certain nombre d'actions sont nécessaires :

- Mise en place d'une gestion intégrée entre la STEP et les agriculteurs du périmètre permettant d'élargir les horaires des lâchées d'eau ;
- Identifier des sites favorables à la recharge artificielle de la nappe au niveau du périmètre, cela permettra la recharge de la nappe, ainsi qu'une meilleure épuration et purification de l'eau.

### 3.3.3 Protocole d'enquêtes

Le périmètre de Mascara, situé au Sud de la ville, constitue un site expérimental traitant à la fois les mécanismes de gestion et de partage de l'eau sous ses différentes formes, l'impact du type de ressource sur le choix des cultures, le mode d'irrigation et les quantités en eau consommées. Il est indispensable d'étudier la dynamique hydro-agricole au sein de ce périmètre, par le biais d'enquêtes.

Nos enquêtes se sont déroulées en deux étapes distinctes, d'avril 2014 à juillet 2014, et d'avril à mai 2015 afin de constituer une vision rétrospective de la dynamique agricole, à travers des entretiens avec les irrigants, les gestionnaires des eaux de la station d'épuration et les représentants des collectivités locales. Au total, 28 intervenants ont participé aux entretiens, dont des propriétaires et des locataires terriens, un technicien de la station d'épuration et un responsable issue de la mairie de la commune ayant la fonction de président d'un GIC au sein du périmètre irrigué (Groupement d'Intérêt Commun), les intervenants représentant près de 55% des agriculteurs du périmètre étudié.

La période d'enquête correspond à la phase où l'irrigation agricole est importante. Ces enquêtes se sont déroulées sur deux étapes en s'inspirant des travaux d'Amichi et al. (2015) :

- Une enquête préliminaire afin de se familiariser avec les agriculteurs du site et mettre en valeur l'objet de notre travail, évaluer l'échantillon et ainsi préparer notre questionnaire. L'analyse des entretiens préliminaires a permis de mettre l'accent sur l'interdépendance des pratiques agricoles et les différentes ressources en eau du site, et des degrés d'implication des acteurs dans la gestion des ressources hydriques, à savoir les propriétaires de puits et des terres, les usagers des eaux de la station d'épuration, les irrigants à partir de multiples ressources en eau, et les locataires des terres et de l'eau. Ce qui nous a permis d'orienter nos questions autour des impacts liés à l'utilisation des différents types de ressources en eau sur cinq modèles d'acteurs différents : 1 – usagers de l'eau de la nappe ; 2 – usagers de l'eau de la STEP ; 3 – usagers de l'eau brute de l'oued ; 4 – usagers de l'eau de la nappe et la STEP ; 5 – usagers de ressources multiples (nappe, STEP et oued).

- Une enquête profonde auprès des usagers de l'eau bien répartis sur l'ensemble du périmètre portant sur leur identification sur la base de type de ressource en eau utilisée, sur les types de cultures pratiqués selon le type de ressource en eau utilisée, sur les intrants utilisés, sur les rendements obtenus, sur les quantités en eau d'irrigation utilisées par type de culture et par système d'irrigation, et sur les relations socio agricoles qui règnent au niveau du périmètre.

Nous avons rapporté les discours de chacun, et ainsi analysé les convergences et les divergences afin d'élaborer une typologie d'usage et son impact sur la base de la ressource en eau utilisée.

### 3.4 Résultats

#### 3.4.1 Typologie agricole de la zone d'étude

Le site d'étude est marqué par une diversité de pratique maraichères, tributaire du type de ressource en eau utilisé pour l'irrigation. Le passage par la typologie agricole est nécessaire pour la caractérisation de la demande en eau d'irrigation (Labbé et al., 2000).

Le périmètre étudié se caractérise par des exploitations agricoles de superficie comprise entre trois et dix hectares. Rares sont les exploitations qui dépassent dix hectares. Les parcelles privées constituent la plus grande partie du périmètre, environ 60%.

Les surfaces cultivées sont à 80% irriguées, les 20% restant sont constituées de céréales et de jachère. L'eau utilisée provient en grande partie de la nappe, et constitue la principale source d'approvisionnement, cette dernière étant appuyée par l'eau de la station d'épuration de la ville de Mascara et par l'eau de l'oued de Mascara. Certains agriculteurs s'organisent sous forme de groupement d'intérêt commun (GIC), reconnu par l'administration publique, afin d'en bénéficier des autorisations de creusement de puits et maintenir la vie de leurs exploitations agricoles, cette situation est souvent rencontrée chez les agriculteurs éloignés du réseau des eaux non conventionnelles.

La pratique du maraichage ne permet pas l'union à long terme des GIC, les agriculteurs d'un même GIC partagent uniquement l'eau selon leurs superficies et le type de culture pratiqué. Il arrive même que certains louent leur terre et leur part en eau.

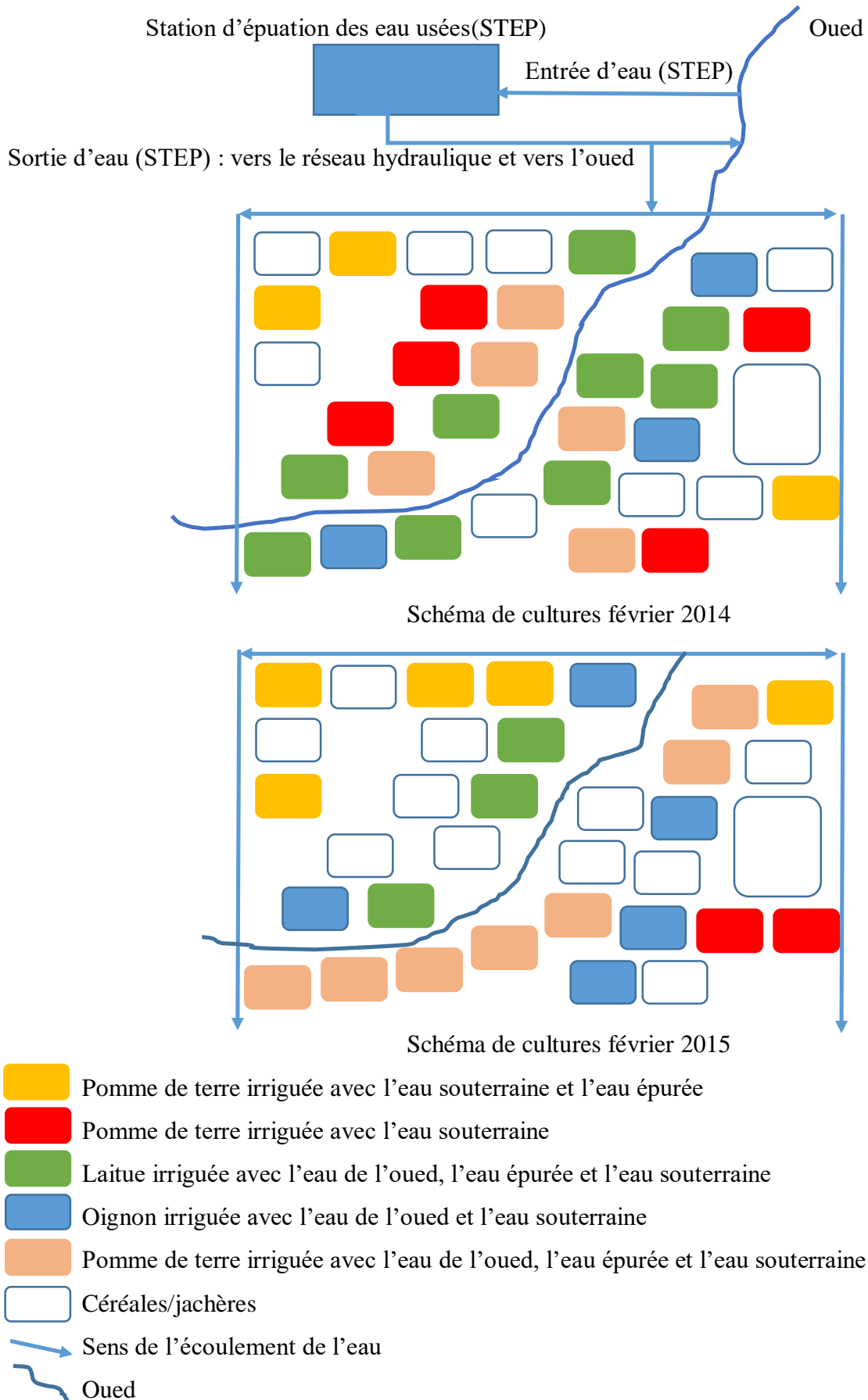
La dynamique agricole, caractérisée par trois cultures distinctes, pratiquées en fonction du type de la ressource en eau et en fonction du précédent cultural. On distingue trois catégories : Les cultivateurs de pomme de terre, les cultivateurs de laitue et les cultivateurs d'oignon, ces trois catégories sont spatiotemporellement mobiles, le même cultivateur de pomme de terre peut se retrouver cultivateur de laitue et d'oignon, cela revient à la rotation culturale, à la saison et à l'emplacement de ses parcelles par rapport à l'oued et par rapport au réseau d'eau de la station d'épuration. L'emplacement proche des eaux non conventionnelles est le plus prisé par les agriculteurs, du fait que l'irrigation avec ces eaux permet la réduction des dépenses dues à l'utilisation des engrais, le tableau 1 illustrant les pratiques d'amendement selon le type d'eau utilisé en irrigation.

Tableau 1 : Rendement moyen des cultures sur la base du type d'eau utilisé

	Type d'eau	Frais et amendement	Rendement moyen (qx/ha)
<b>Pomme de terre</b>	Eau de la nappe	12 quintaux NPK	300
	Eau de l'oued + STEP	0	300
<b>Laitue</b>	Eau de la nappe	5 quintaux NPK	120-150
	Eau de l'oued + STEP	0	120-150
<b>Oignon</b>	Eau de la nappe	9 quintaux NPK	250-300
	Eau de l'oued + STEP	0	250-300

La demande en eau des agriculteurs est très variable selon les pratiques, alors que l'offre globale du périmètre reste assez stable, il en résulte une organisation à la fois interne quand il s'agit de partager l'eau appartenant à un GIC, et d'une organisation collective entre plusieurs GIC et plusieurs agriculteurs individuels et locataires quand il s'agit de partager l'eau non conventionnelle. Ce partage est essentiellement basé sur la surface cultivée, la majorité des agriculteurs admettent qu'une heure suffit pour irriguer un hectare par le système gravitaire.

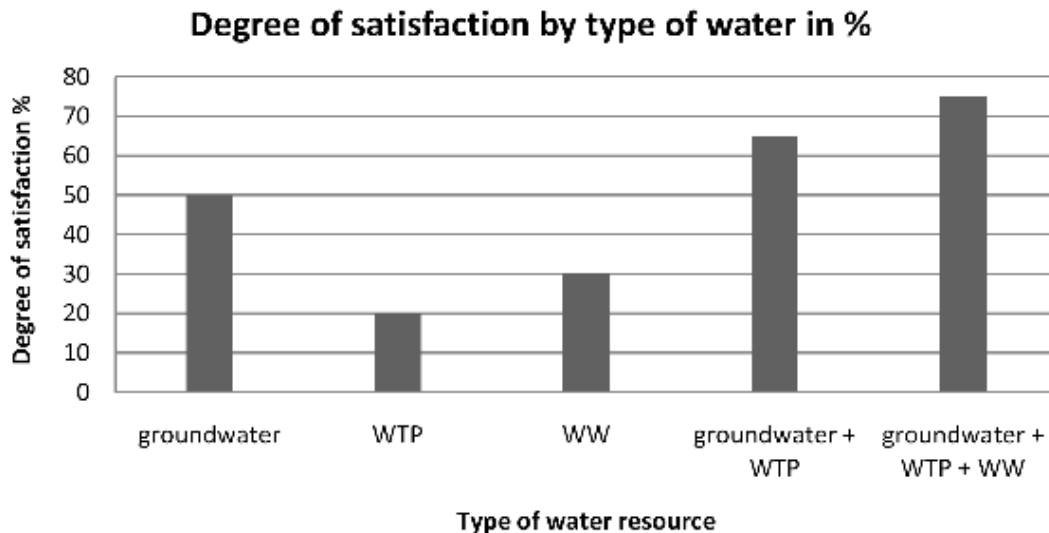
La figure suivante (15) schématise le mode d'assolement cultural autour de l'oued de Mascara et à l'intérieur du périmètre irrigué par les différents types de ressources en eau.



**Figure 15.** Typologie culturelle et rotation au niveau du périmètre de Mascara 2014-2015

### 3.4.2 Impact sur la satisfaction en eau d'irrigation

Plus de 60% des agriculteurs déclarent ne pas disposer de l'eau nécessaire pour l'irrigation des surfaces disponibles. Les taux de satisfaction les plus importants sont enregistrés chez ceux utilisant à la fois l'eau des puits, l'eau de la STEP (WTP) et les eaux usées brutes (WW) (figure 16).



**Figure 16.** Degré de satisfaction en eau d'irrigation selon le type de la ressource

Seuls les exploitants utilisant l'eau de la nappe, l'eau de l'oued et la STEP arrivent à satisfaire leur besoins en eau, cela se comprend par le fait que l'utilisation de ces ressources permet une sous tension et une régénération rapide des eaux des puits. L'inconvénient de cette utilisation est que cette eau est assez onéreuse. Le tableau 2 illustre la qualité de l'eau avant et après épuration.

Tableau 2 : Caractéristique de la qualité de l'eau (STEP)/source : STEP Mascara, 2014

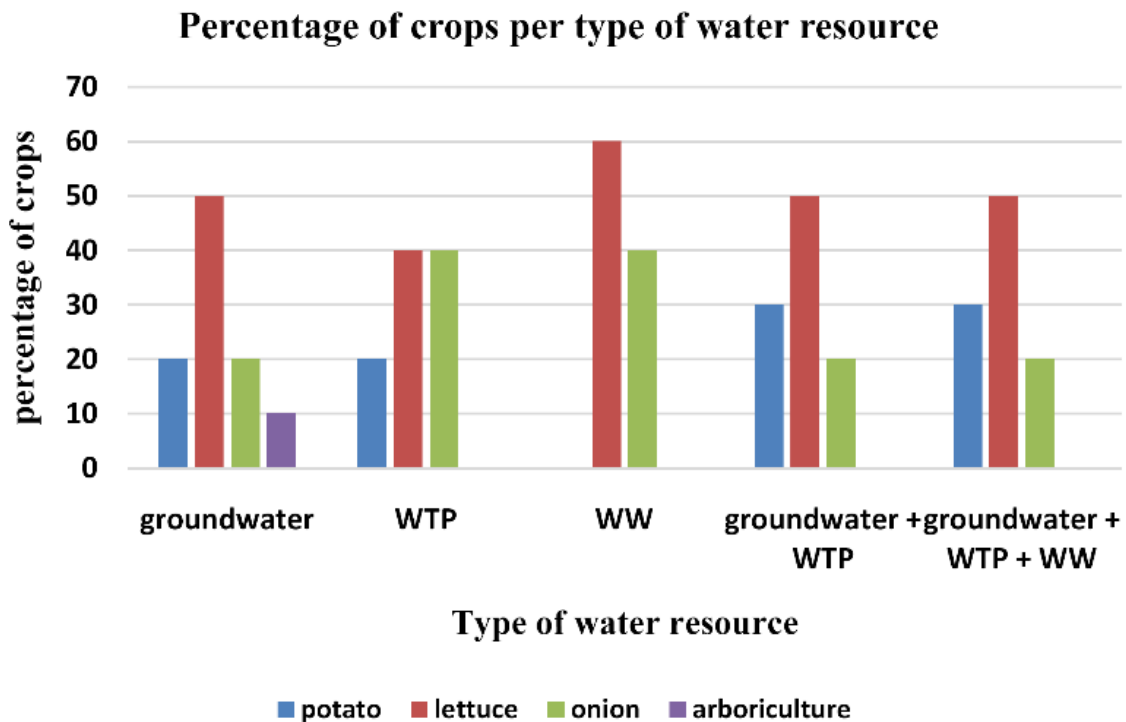
	Unité	Moyenne	
		Entrée (oued)	Sortie (STEP)
Température	°C	15.25	15.166
pH	-	7.472	7.673
MES	mg/l	308.166	9.25
CE	mg/l	2001.56	1820.33
O <sub>2</sub> dissous	mg/l	0.35	1.83
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0.395	0.91
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/l	0.0508	0.131
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	10.625	4.041
P	mg/l	1.179	1.006
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	3.636	3.031
DCO	mg/l	1684	43.25
DBO <sub>5</sub>	mg/l	248.767	34.833

Nos enquêtes révèlent que la moyenne des terres cultivées par exploitant est de 3 à 10 hectares, cette variation est due principalement aux disponibilités foncières et aux disponibilités des ressources en eau. Environ 300 hectares sont irrigués en une seule saison (avril-septembre), 80% des usagers de l'eau de la nappe déclarent pomper l'eau environ huit heures par jour pour des débits approximatifs de cinq litre/seconde. La moyenne des débits d'eau à partir de la STEP pour l'irrigation est estimée à 5675m<sup>3</sup>/jour, ce qui donne pour la même période (saison) une quantité approximative de 1.02 million de m<sup>3</sup>. Nous constatons que la ressource la plus utilisée est celle de la nappe, d'où l'intérêt de la protéger par l'augmentation de l'offre non conventionnelle et la réalisation de bassins de recharge artificielle. La lame d'eau moyenne utilisée est estimée à 10,5mm/jour. Cette quantité est jugée non satisfaisante par les agriculteurs, ce qui laisse poser la question sur l'utilisation efficace de l'eau disponible.

### **3.4.3 Impacts sur les pratiques culturales (choix des cultures, mode d'irrigation et intrants)**

Les exploitants privilégient le type de culture suivant le mode d'approvisionnement en eau d'irrigation (figure 17). Ceux qui s'approvisionnent en eau de la nappe cultivent en grande partie une diversification de maraichage, tandis que ceux qui utilisent l'eau non conventionnelle pratiquent en grande partie les cultures telles que la pomme de terre, l'oignon et la laitue, cette culture, la plus rentable à court terme, attire beaucoup plus que les autres, d'où sa faible demande en main d'œuvre et en intrants agricoles. Les usagers des eaux usées brutes associent prudemment les différents types de ressources en eau afin d'éviter de se retrouver pénalisés lors d'éventuelle intervention des services d'hygiène.





**Figure 17.** Représentation graphique en % des cultures pratiquées selon le type de la ressource

L'irrigation gravitaire, l'irrigation à la raie par des systèmes de canalisation en tube plastique, l'irrigation par aspersion et par le système localisé (goutte à goutte) sont les principaux modes d'irrigation rencontrés dans le périmètre. Cependant, on observe également une combinaison des différents modes d'irrigation. Les systèmes localisés et l'aspersion sont observés uniquement chez certains irrigants utilisant l'eau de la nappe, afin de mieux valoriser leurs ressources en eau et en énergie, ces agriculteurs disent être prêts à participer financièrement à l'extension et à la maintenance du réseau de la station d'épuration. « Si l'eau est desservie à volonté, ces investissements peuvent être assimilés aux dépenses dues aux pompages des eaux des puits ».

Les exploitants qui s'approvisionnent en eau usée brute utilisent en majorité le système gravitaire, ils ont conscience de la non durabilité et des risques de cet usage, préfèrent ne pas investir davantage dans les équipements de l'irrigation.

Les agriculteurs, dépourvus de conseils, utilisent mal ou insuffisamment les engrais et les pesticides, le traitement phytosanitaire est toujours curatif, jamais préventif et souvent effectué trop tard. Ceci entraîne un rendement au mètre cube d'eau utilisé pour les traitements inférieur à l'espérance du travail et les dépenses fournies. Les engrais chimiques, les fumures organiques et les produits phytosanitaires constituent les principaux intrants utilisés chez les irrigants avec l'eau souterraine.

Il apparaît nettement que le taux d'utilisation des intrants est fortement influencé par le mode d'approvisionnement en eau et du type de culture pratiqué. La richesse des eaux de l'oued en éléments nutritifs constitue un apport assez important, très apprécié par les cultivateurs de la pomme de terre et de la laitue, ce qui rend ces spéculations rentables par une réduction des dépenses en intrants. Les cultivateurs de la pomme de terre à raison de 26 quintaux par hectare de semence arrivent à obtenir des rendements de l'ordre de 300 quintaux par hectare sans amendement quand il s'agit d'irriguer avec l'eau de l'oued brute. Les mêmes rendements sont obtenus chez les irrigants avec l'eau de la nappe à condition d'utiliser entre 10 et 12 quintaux par hectare d'engrais chimiques. Ceux cultivant la laitue et l'oignon utilisent 5 et 9 quintaux d'engrais à l'hectare afin d'obtenir des rendements respectifs de 120 à 150 quintaux (laitue) et 250 à 300 pour l'oignon. Cette situation favorisant les agriculteurs qui sont situés près du cours d'eau et du réseau de la station d'épuration, entraîne une certaine concurrence et dynamique basée essentiellement sur le type d'eau utilisé. Voir le tableau (1) illustré dans la section « typologie agricole dans la zone d'étude » montrant les quantités en engrais utilisés et les rendements moyens obtenus en fonction des pratiques et du type d'eau utilisé en irrigation.

#### **3.4.4 Stratégies des agriculteurs face aux impacts de l'usage non durable des nappes**

Afin de faire face à l'usage non durable de la ressource en eau, les agriculteurs développent des stratégies que l'on peut qualifier de « stratégie offensive ». Celles-ci consistent à investir et chercher davantage les ressources en creusant plus profondément sur les puits existants et creuser de nouveaux puits, certains louent des terres et puits pour maintenir leur système de production et leur profession. Afin de bénéficier des autorisations de réalisation de forage, les agriculteurs s'organisent en forme d'association prénommée GIC (Groupement D'intérêt Commun), car il est plus facile de délivrer des autorisations de forage au GIC, constitué de plusieurs agriculteurs souvent de la même famille.

L'autre stratégie adoptée par les agriculteurs que l'on peut qualifier de « stratégie défensive ». Consiste à s'adapter aux circonstances, notamment le manque des ressources en eau, par la diminution des terres cultivées, la conversion vers des pratiques culturales économes en eau ou pluviales, et les pratiques de l'élevage.

Souvent les agriculteurs choisissent l'une des deux stratégies selon leur capital et leur intégration socio professionnelle dans la communauté. Le recours aux creusements de puits nécessite des investissements et des organisations collectives, synonymes de larges formalités administratives.

### 3.5 Discussion

L'utilisation conjointe des eaux de surface comme principale source, et des eaux souterraines comme source alternative pour une utilisation optimale des ressources en eau à susciter l'intérêt de plusieurs auteurs (Alam, 2015 ; Pavelic et al., 2012 ; Dongyuan et al., 2010 ; Evans, 2010; Fisher et al., 1995 ; Hamamouche et al., 2017), qui ont mis le point sur son efficacité lors des variabilités climatiques et lors de la rareté des eaux de surface.

Contrairement aux résultats cités auparavant, notre cas illustre comment les eaux non conventionnelles de surface sont devenues source alternative aux eaux souterraines, illustrent l'influence du type de ressource en eau utilisé pour l'irrigation au sein d'un système de gestion cogéré délégué. Les irrigants s'organisant sous forme de GIC (Groupement d'Intérêt Commun), afin de bénéficier des facilités accordées par les autorités locales en matière d'accès à la ressource en eau, ils ont mis en valeur leurs besoins communs à l'accès à la ressource en eau, en démontrant l'efficacité de l'attachement au capital social, ce qui conforme aux résultats obtenues par Sanginga et al. (2007) in (Jimmy et al., 2016). Néanmoins, cette organisation montre certaines limites dues à l'absence de synergie avec les gestionnaires de la station d'épuration. L'intégration d'une nouvelle ressource en eau dans un système d'irrigation existant n'est pas simple, une gestion concertée et planifiée est nécessaire (Hamamouche et al., 2017). Les études menées par Lam (1998) et Siderius et al. (2015) confirment l'avantage des systèmes décentralisés gérés par les communautés par rapport aux systèmes gérés par les pouvoirs publics, du fait de leur adaptabilité facile aux changements des systèmes de gouvernance.

La délégation de la gestion de l'eau potable des services publics aux secteurs privés a été décrite par plusieurs auteurs, mais peu d'entre eux se sont intéressés à l'eau agricole et à l'impact engendré par cette forme de gestion. Le travail mené par Briand et al. (2004) montre aussi la limite de la gestion institutionnelle de la ressource en eau potable en Afrique, ce qui a mené à la privatisation de la distribution de l'eau. Bréthaut (2012), a mis l'accent sur le pouvoir du tourisme en tant que facteur poussant les acteurs à instaurer des arrangements trans-territoriaux et intersectoriels autour de la gestion de l'eau, mais doit être mise en perspective avec les usagers de l'eau dans l'ensemble du bassin versant. Petrella *in* (Dembele, 2007) estime que l'eau comme « bien commun » est incompatible avec l'idée de l'eau est « bien économique » qui est mise en œuvre par le partenariat mondial de l'eau, ce qui freine le principe de la gestion intégrée des ressources en eau. Boyer et al. (2001), évoquent aussi le mode de gouvernance et de maîtrise de la gestion de l'eau potable de trois pays, les Etats Unis, l'Angleterre et la France, en illustrant la variété et la complexité des modes de gouvernance, chacun se distingue de manière importante d'un point de vue institutionnel et contractuel. La gouvernance

institutionnelle peut envisager un encadrement d'une gestion déléguée de la ressource en eau si le délégant dispose d'une compétence et d'une autonomie réglementaire (Boyer et al., 2001). L'analyse des études précédentes montre la complexité de la gestion de l'eau et la difficulté de dresser une gestion locale uni-sectorielle. Le présent travail traite de la gestion de l'eau agricole au sein d'un périmètre irrigué, et montre comment l'irrigation peut devenir un facteur d'émergence d'approche à l'échelle locale, où souvent le manque de moyens humains et matériels constitue un frein au développement de la gestion intégrée des ressources en eau dans les pays en développement (Dembele, 2007). Raschid-Sally et al. (2005) mettent en évidence l'avantage que peut avoir l'agriculture des eaux usées si elle est bien gérée par sa réduction de la pauvreté urbaine et périurbaine. L'idée que l'eau est « bien économique » commence à s'instaurer au milieu de la communauté du périmètre de Mascara, la plupart d'entre eux disent qu'ils sont prêts à payer l'eau provenant de la station d'épuration, cela revenait aux mêmes dépenses consenties par la consommation énergétique due aux pompes des eaux souterraines. La mise en exploitation légale des eaux souterraines et la distribution de l'eau issue de la station d'épuration de Mascara ont été les facteurs clés du développement des surfaces irriguées et de la croissance de l'agriculture du périmètre. Cette ressource si rare et fragile entraîne souvent des adaptations pilotées par les usagers eux-mêmes afin de faire face aux risques liés aux menaces de leurs pratiques agricoles. Le choix du système d'irrigation, du type de culture, et d'amendement selon le type de ressource en eau est le témoin de l'ingéniosité des agriculteurs du périmètre d'étude. De plus, leur organisation collective autour de la gestion de la ressource en eau est un facteur déterminant de leur subsistance.

Le manque de politique rigoureuse sur la gestion de l'eau agricole, ainsi que le manque de coordination entre les institutions publiques de gestion de l'eau et les usagers souvent en situation informelle, rend complexe l'estimation de la consommation, du bilan hydrique et de la durabilité des différentes ressources. Néanmoins, les irrigants du périmètre de Mascara ont pris l'initiative de réaliser un réseau d'irrigation commun permettant la quantification d'une partie des ressources en eau utilisées, estimés à 1/5 de la totalité de l'eau d'irrigation.

Le recours à l'irrigation par des eaux de différentes sources, à savoir ; souterraine, usée épurée, et résiduaire brute, implique des stratégies et des choix adaptatifs comprenant les types de cultures, leurs modes d'irrigation et les amendements adéquats. Les agriculteurs du périmètre de Mascara semblent avoir les connaissances et les mécanismes nécessaires qui leur permettent une meilleure valorisation du système hydro-agricole au sein du périmètre. Toutefois, La question sur l'efficacité et l'efficience de l'utilisation de l'eau disponible reste problématique.

L'avenir du périmètre repose en grande partie sur la disponibilité de l'eau et sur son utilisation efficiente.

### **3.6 Conclusion**

La priorisation de la distribution de l'eau potable en premier rang touche directement le secteur agricole, ce dernier souffrant du manque d'eau, a conduit les agriculteurs à concevoir des stratégies collectives, c'est le cas des agriculteurs du périmètre de Mascara.

Le recours aux différents types de ressources en eau, souterraines, usées épurées et brutes constitue la solution pour faire face au manque d'eau pour les agriculteurs, ce recours aux différents types de ressources implique des regroupements et des adaptations collective en concertation avec les représentants des services publics et les gestionnaires de la station d'épuration.

Ce qui compte le plus aujourd'hui pour les agriculteurs du périmètre de Mascara, c'est d'être approvisionnés en eau en continu, l'acceptation de payer un prix raisonnable l'eau de la station d'épuration constitue une libération au secteur économique de l'eau, cela pouvant être assimilé aux dépenses dues aux consommations électriques des pompes.

La délégation de la gestion de l'eau aux usagers doit être encadrée, un partenariat public-usagers (privé, GIC ou association) pouvant être la solution optimale pour définir les règles d'approvisionnement. L'objectif serait le développement d'une gestion déléguée de l'eau d'irrigation afin d'accroître l'efficacité et l'efficience de l'utilisation de l'eau en se basant sur les principes économiques et sur l'équité de partage.

## **Chapitre 4**

# **Modélisation des pompages en eau d'irrigation par la télédétection**

#### 4.1 Introduction

Les procédures et les méthodes basées sur la télédétection permettant l'estimation des quantités en eau dans le sol à chaque instant sont validées (Toureiro et al., 2016). Ce qui permet de déterminer les exigences en eau des cultures (Allen et al., 1998).

L'eau transpirée par les plantes est fortement liée à l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Choudhury et al., 1994; Bausch, 1995). Ce dernier permet la dérivation des coefficients  $K_{cb}$  (Basal crop coefficient) et le calcul des évapotranspirations à partir des images satellitaires. Les relations entre NDVI et  $K_{cb}$  ont fait l'objet de beaucoup d'études, (Michael et Bastiaanssen, 2000; Neal et al., 2005; Gonzalez-Dugo et al., 2009; Droogers et al., 2010; Allen et al., 2011a; Allen et al., 2011b), and (Toureiro et al., 2016), ces auteurs ont montré des relations linéaires entre l'évolution temporelle du NDVI et les coefficients de la végétation. Le calcul de l'évapotranspiration permet la détermination des besoins en eau des cultures et par conséquent les volumes en eaux à utiliser par les agriculteurs. Les eaux souterraines, considérées comme ressources individuelles (Margat, 2008), ont permis le développement de plusieurs millions de forage à travers le monde (Shah, 2009). En Afrique du Nord, la surexploitation des nappes touche plus de 50% (Kuper et al., 2016), l'estimation des pompages reste problématique et se fait avec beaucoup d'incertitudes (Margat, 2008). Les méthodes d'estimation des pompages sont multiples, elles sont basées souvent sur les mesures directes (débitmètres) ou sur les besoins théoriques des cultures et les statistiques, ou sur la télédétection combinée aux besoins théoriques des cultures qu'il faut ajuster par des coefficients de correction (Castaño et al., 2010 ; Wada et al., 2012).

Selon le Plan Bleu (Blinda e Thivet, 2006), l'agriculture des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée consomment environ 80% de la demande totale en eau. En Algérie, les eaux souterraines constituent les ressources les plus fragilisées par le développement agricole (Siebert et al., 2010). Devenue une des principales régions d'utilisation intensive des eaux souterraines pour l'agriculture dans le monde, cette opération qualifiée de révolution informelle est souvent développée hors des champs des politiques publiques (Siebert et al., 2010).

Le taux de mobilisation des ressources souterraines renouvelables (rapport entre les prélèvements et la recharge) est élevé pour le cas d'un pays comme l'Algérie, le taux d'exploitation moyen est de 80% (Faysse et al., 2011). Le constat est reflété par la surexploitation de la plupart des grands aquifères, tels que ceux de la plaine de Mascara et du plateau de Mostaganem en Algérie (Boudjadja et al., 2003 ; Faysse et al., 2011).

L'évapotranspiration est considérée comme le plus important flux de l'équilibre du bilan hydrique dans ces zones (Poussin et al., 2008). Les méthodes d'estimation de ce paramètre sont

développées à partir des données de télédétection, en se basant sur l'estimation de l'énergie de surface utilisant l'imagerie thermique à l'échelle instantanée au moment du passage du satellite (Delogu et al., 2012). Ces méthodes ne permettent pas la validation de l'estimation des températures de la surface du sol et par conséquent l'extrapolation de l'évapotranspiration (Chirouze et al., 2014).

La présente étude utilise l'approche SVAT (Sol Végétation Atmosphère Transfert) pour la simulation de l'évapotranspiration, en utilisant la télédétection combinée au suivi de l'état hydrique du sol. La méthode Dual Crop de la FAO-56 demeure l'approche la plus pratiquée pour estimer les besoins en eau des cultures (Allen et al., 1998). Elle sépare la transpiration des plantes ( $K_{cb}$ ) de l'évaporation du sol ( $K_e$ ). L'évaporation des sols ( $K_e$ ) est liée à la fraction du couvert végétal ( $F_c$ ) (Huete et al., 1985), ce dernier peut être lié linéairement au  $K_{cb}$  des plantes (Choudhury et al., 1994).

Le modèle SAMIR (Satellite Monitoring of Irrigation) utilisé dans cette étude, permet la simulation spatiale des évapotranspirations et des besoins en eau des cultures (Simonneaux et al., 2009). Il est alimenté par les données de l'évapotranspiration de référence et les pluies locales et par une série chronologique des indices de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) à moyenne résolution (Landsat 8). Sa combinaison avec le modèle FAO-56 fournit l'information réelle de l'état végétatif ( $K_{cb}$  et  $F_c$ ) (Saadi et al., 2015). L'objectif attendu de cette contribution est l'estimation des volumes d'eau utilisés dans l'irrigation d'une parcelle d'agrumes de 20 hectare conduite au système d'irrigation localisé au nord de la Macta en utilisant le modèle SAMIR, ensuite comparer les simulations du modèle aux mesures des pompages réelles afin d'en apprécier la fiabilité et la précision.

### **4.2 Aperçu sur le modèle SAMIR**

Le modèle SAMIR utilise la base algorithmique de la méthode FAO-56, selon Er-Raki et al. (2007). Cette méthode est bien adaptée à la spatialisation de l'évapotranspiration sur de grandes surfaces, notamment les cultures de l'olivier et des agrumes à partir des images Landsat TM et MODIS (Er-Raki et al., 2007 ; Simonneaux et al., 2008 ; Benhadj et al., 2012).

Elle est basée sur le concept de l'évapotranspiration de référence d'un couvert végétal bien pourvu en eau, modulé par des coefficients  $K_{cb}$  représentant la transpiration des cultures, et  $K_e$  représentant l'évaporation du sol. Ces coefficients sont déterminés à partir des NDVI issus des images satellitaires après leur interpolation journalière effectuée soit linéairement ou par spline. Le bilan hydrique du sol est réalisé en combinant avec le modèle empirique de Zhang et Wegehenkel (Zhang e Wegehenkel, 2006) divisant le sol en trois compartiments.



SAMIR peut utiliser le logiciel LocClim de la FAO, en calculant l'évapotranspiration de référence à partir de l'interpolation journalière des variables climatiques dans un espace de grille à pas de 16 km. Il utilise également les modèles climatiques tels que ALADIN (Simonneaux et al., 2009). A l'échelle parcellaire, on peut introduire des mesures ponctuelles réelles issues des stations météorologiques les plus proches, particulièrement des valeurs pluviométriques journalières sous forme de données pouvant être interpolées spatialement.

Les valeurs qui peuvent être considérées comme étant constantes à l'échelle spatio-temporelle doivent être définies impérativement par l'utilisateur, sont les suivantes : la profondeur racinaire minimum et maximum, la profondeur du sol, la fraction facilement évaporante du sol, les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement, et la réserve en eau initiale du sol.

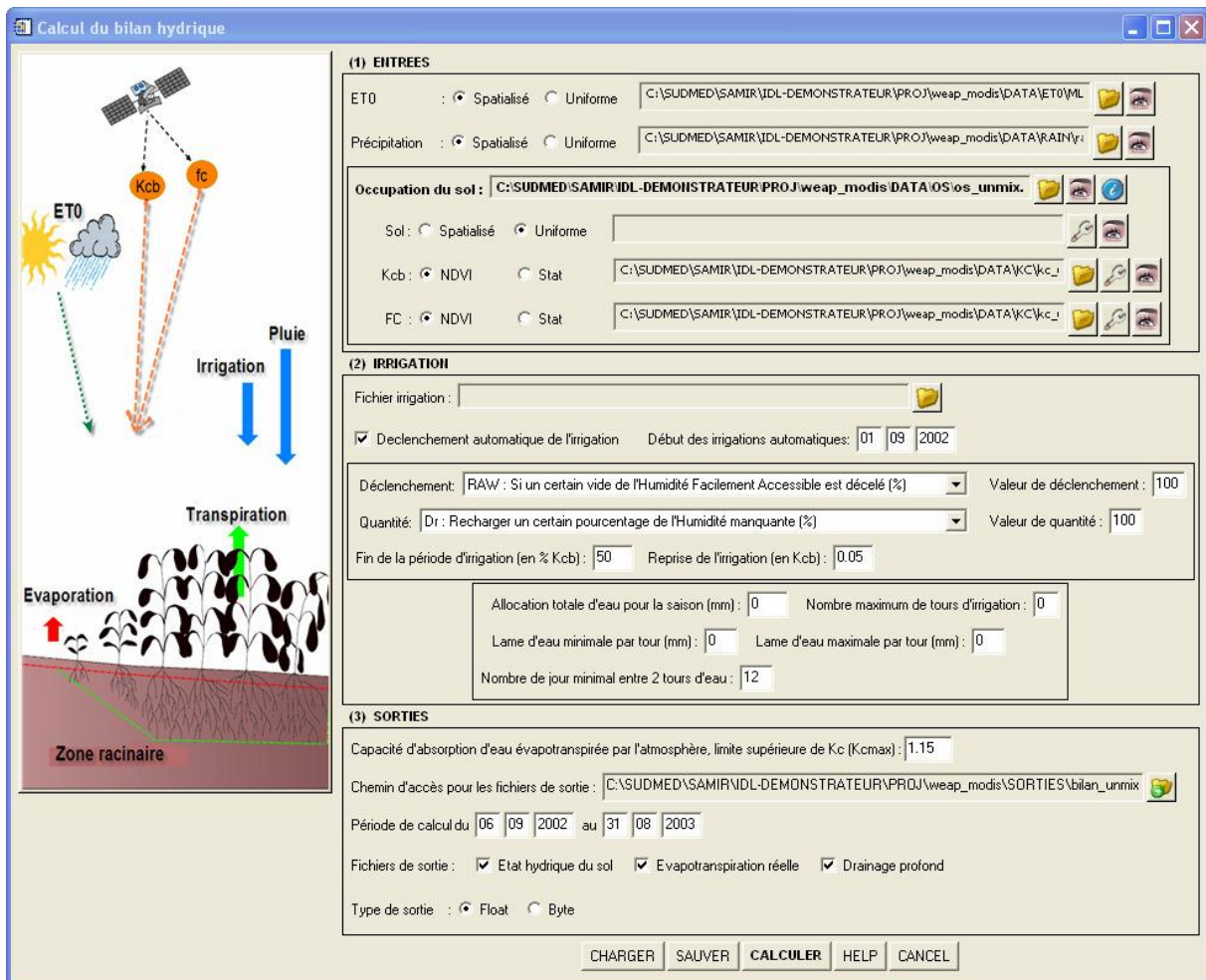
SAMIR utilise les cartes pédologiques, dans lesquelles on définit trois horizons à teneur en eau différentes (Zhang e Wegehenkel, 2006). Le premier horizon à épaisseur fixe contrôle l'évaporation du sol, alors que le deuxième à épaisseur variable contrôle la transpiration de la végétation. Il est contrôlé par le NDVI et le taux du couvert végétal. L'horizon profond permet le drainage au-delà de deux (2) mètres de profondeur.

L'occupation végétale du sol ne peut être cartographiée de manière fiable par télédétection qu'à partir du moment où l'on dispose d'un certain nombre d'images, donc plutôt en fin de saison culturale (Simonneaux et al., 2009). L'utilisation des images à haute résolution à intervalle de quinze jours et plus, dans le but de se renseigner sur l'état phénologiques des cultures est une méthode reconnue (Minacapilli et al., 2008 ; Ray et Dadhwl, 2001). L'indice NDVI issu du traitement des images satellitaires est lié linéairement au  $K_{cb}$ , différentes relations sont disponibles dans la littérature selon le type de culture (Ray e Dadhwl, 2001 ; Duchemin et al., 2006).

SAMIR permet de séparer l'évaporation du sol de la transpiration de la plante ( $K_{cb}$  et  $K_e$ ), ainsi que l'état hydrique du sol. Le déclenchement des irrigations se fait systématiquement à un certain seuil d'épuisement de la réserve utile en eau du sol. Ce seuil est déterminé par l'utilisateur en prenant en considération les pratiques réelles de l'irrigant. Cette gestion d'irrigation convient à l'échelle parcellaire, permettant de définir les apports et les fréquences des irrigations. A grande échelle, SAMIR fournit l'information globale sur les consommations en eau en fin du cycle cultural et non pas dans l'ordre chronologique des irrigations.

## Chapitre 4 : Modélisation des pompages en eau d'irrigation par la télédétection

L'architecture du logiciel s'articule autour de l'équation de la méthode FAO-56. Il y a un module  $ET_0$ , un module Occupation du Sol, un module  $K_c$ , un module précipitation et un module irrigation comme le montre la figure suivante :



**Figure 18.** Interface de SAMIR

Chaque module présente plusieurs options de calcul. Ces modules sont des étapes pour créer des données utilisables dans le module évapotranspiration et bilan hydrique.

Les sorties de SAMIR sont soit sous forme de tableau/graphique, soit sous forme d'image. L'évapotranspiration en sortie est calculée au pas de temps journalier.

SAMIR est un logiciel qui calcule la spatialisation de l'évapotranspiration (ET) et le bilan de l'eau d'irrigation à l'échelle régionale en utilisant des séries satellitaires. La télédétection permet d'avoir une vue d'ensemble du développement de la végétation, ce qui représente une information fondamentale pour un calcul fiable de l'ET. Cette dernière est déterminée en utilisant la méthode FAO-56. Le calcul du bilan hydrique nécessite des variables climatiques (l'évapotranspiration de référence et les précipitations), des données sur l'occupation du sol et sur le développement des cultures en vue d'estimer les coefficients culturaux. Ces deux derniers

types de données sont déterminés par télédétection. L'irrigation peut être une autre variable si elle est connue, mais le plus souvent, elle est déterminée sur la base du bilan hydrique, en avançant deux hypothèses sur les modalités de gestion de l'eau et surtout, sur le niveau de stress hydrique admis. Les données estimées pour l'irrigation dans les différents secteurs peuvent être comparées avec les quantités d'eau d'irrigation apportées par les barrages et les eaux de surface afin d'estimer les pompages réalisés dans la nappe. Vu la pression considérable à laquelle sont soumises les ressources en eau, il y a lieu de mettre en évidence le potentiel des images satellites pour le suivi de l'irrigation et la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant.

L'architecture de SAMIR est délimitée en trois grandes parties que l'on pourrait qualifier de préparation des données, calcul proprement dit de l'évapotranspiration et/ou état hydrique du sol pour finir avec une analyse des données.

Les sous menus regroupés dans la préparation des données permettent d'effectuer des calculs intermédiaires pour prendre en compte les cinq grands groupes d'informations suivant :

#### 4.2.1 Les données climatologiques (pour obtenir le terme $ET_0$ )

Le calcul de l' $ET_0$  peut être réalisé à partir de trois sources de données différentes : climatologie, stations météo, modèle météo.

L'option  $ET_0$  Penmann-Monteith est incluse dans SAMIR, elle est calculée pour chaque pixel de 16km de résolution pour un pas de temps journalier, en utilisant les données de température, d'humidité, de vitesse du vent et de rayonnement solaire. Les 2 figures suivantes (19 et 20) montrent l'interface de l'étape  $ET_0$  Penmann-Monteith, et la spatialisation de l' $ET_0$  :

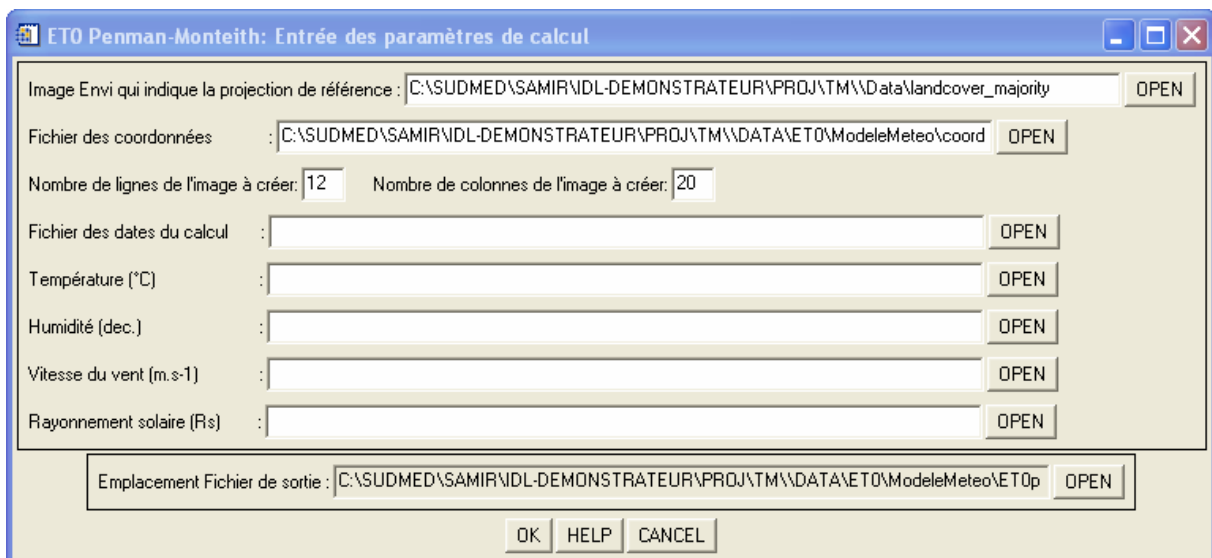
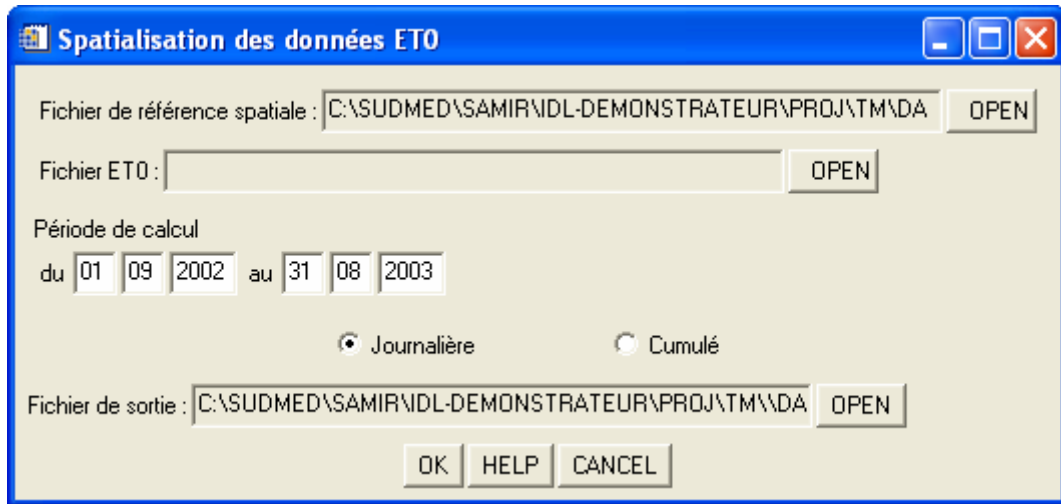


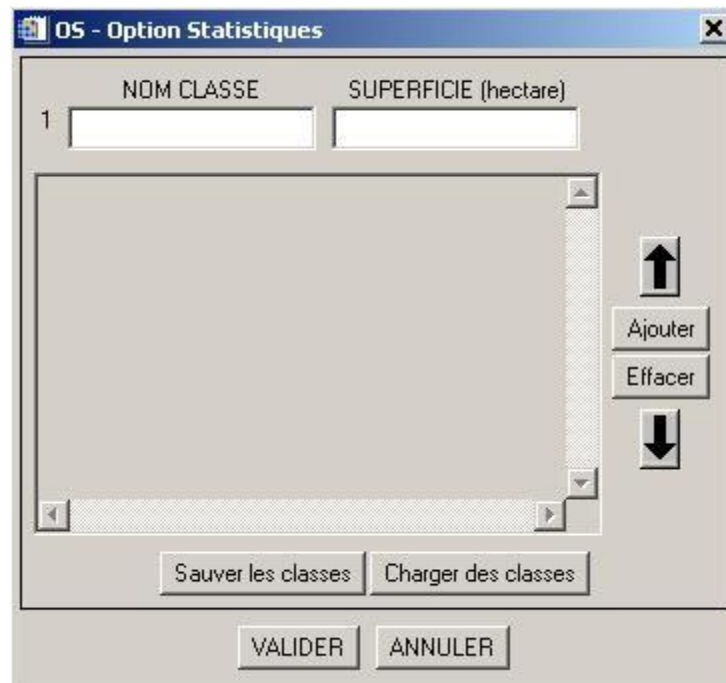
Figure 19. Module  $ET_0$ , entrée des paramètres de calcul  $ET_0$  Penmann-Monteith



**Figure 20.** Spatialisation de l'ET<sub>0</sub>

#### 4.2.2 L'occupation du sol (pour spatialiser les résultats)

Le calcul de l'occupation du sol peut être réalisé à partir de trois sources de données différentes : statistiques régionales/utilisateurs, landuse (occupation du sol standard), série temporelle NDVI. L'option statistique permet à l'utilisateur de fabriquer une occupation du sol en indiquant le nombre de cultures présentes sur sa zone ainsi que leurs superficies respectives en renseignant les zones de texte NOM CLASSE et SUPERFICIE (figure 21) puis en cliquant sur ajouter, à chaque opération la classe d'occupation du sol créée ainsi que sa superficie.



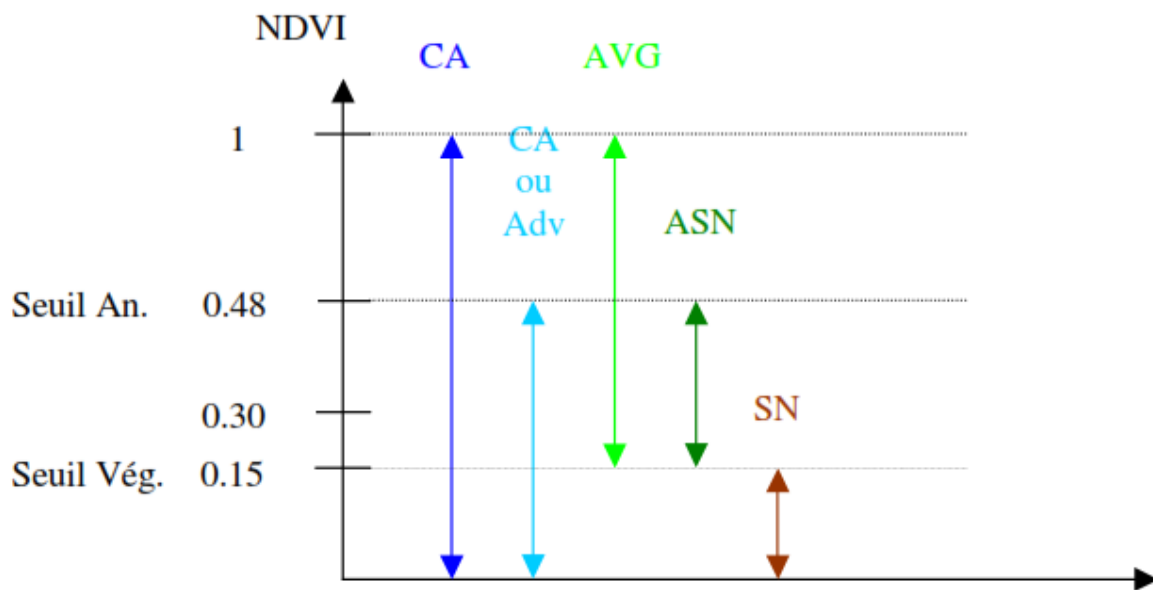
**Figure 21.** Classification de l'occupation des sols

L'option série temporelle NDVI spatialisée, correspond à ce qui est observé sur une période précise à partir de données de télédétection. Le principe général de cette méthode repose sur

l'étude de l'évolution du NDVI pour chaque pixel. On suppose que chacune des classes a un profil NDVI caractéristique qui permet de les différencier entre elles. En général on distingue cinq grandes classes :

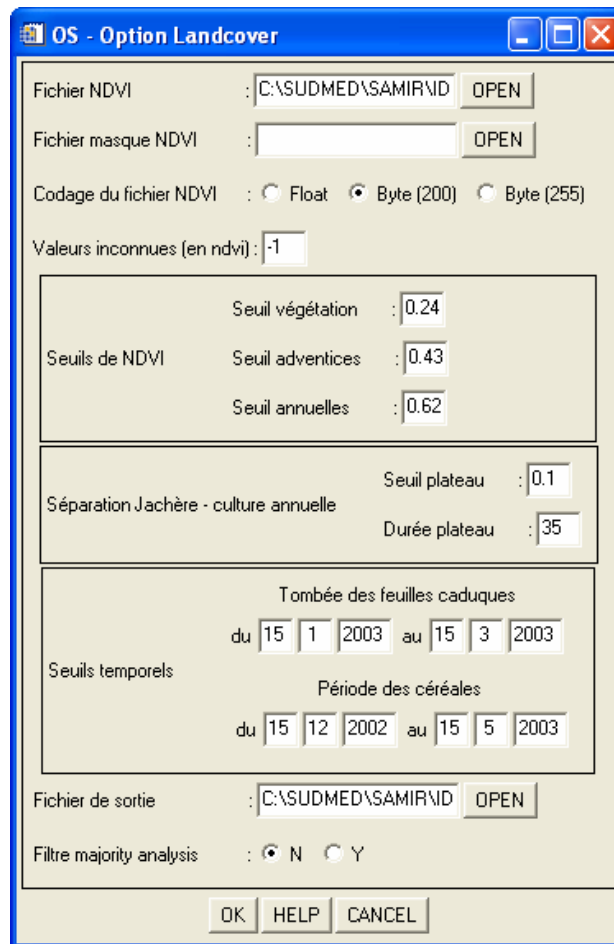
- A- Sols toujours nus sur la période observée (SN).
- B- Arbres + sol nu (ASN).
- C- Arbres + végétation (AVG).
- D- Cultures annuelles (CA).
- E- Cultures annuelles ou adventices (CA\_ou\_adventices).

La distinction entre les différentes classes est faite par seuillage. Deux seuils sont utilisés, un seuil végétation et un seuil annuel. Le principe peut être résumé suivant cette figure :



**Figure 22.** Seuillage de classification culturelle

La figure suivante (23) montre l'interface du module occupation du sol basée sur l'option série temporelle NDVI :



**Figure 23.** Occupation des sols selon les séries temporelles NDVI sous SAMIR

#### 4.2.3 Les données phénologiques (pour obtenir le terme $K_c$ )

Le calcul du  $K_c$  est réalisé selon deux sources de données différentes : 1- statistiques régionales/utilisateurs, 2- série temporelle NDVI.

Le  $K_c$  statistique permet de configurer des courbes  $K_c$  pour les occupations du sol préalablement définies (figure 24), Le programme récupère l'Occupation du Sol de l'option « Statistiques - Utilisateur » et permet à l'utilisateur de remplir un tableau de paramètres utilisés pour fabriquer la courbe des  $K_c$  pour chaque classe (figure 25).

Les paramètres considérés pour le calcul sont :

- $K_{cini}$ ,  $K_{cmid}$ ,  $K_{cend}$  et  $K_{coff}$  pour les arbres ;
- Debut\_cycle => date de semis ;
- Long\_ini => longueur de la période initiale ;
- Long\_dev => longueur de la période de croissance ;
- Long\_mid => longueur de la période de plateau ;
- Long\_end => longueur de la période de sénescence.

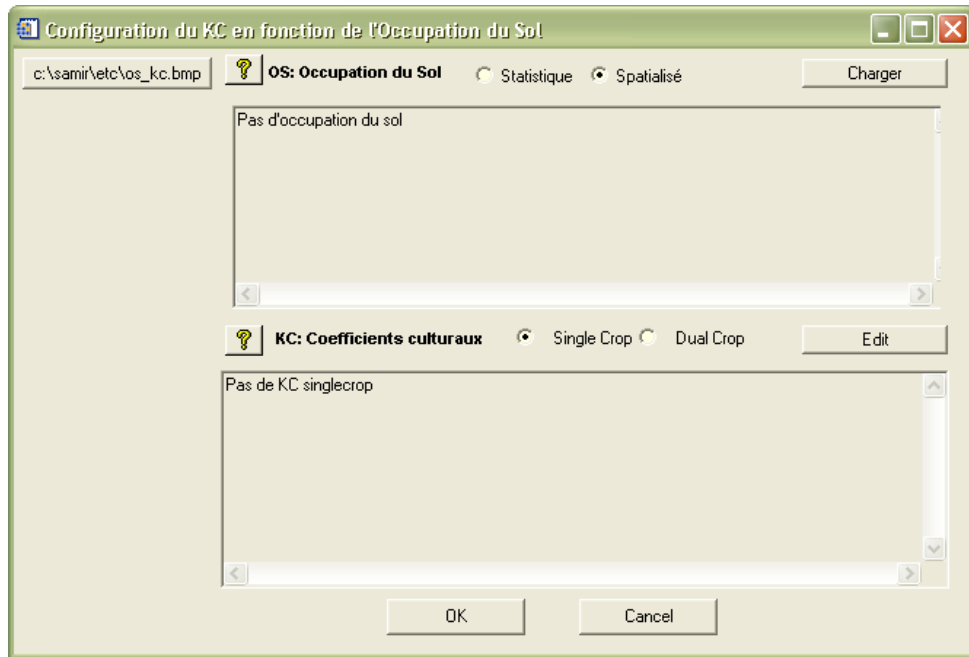


Figure 24. Configuration de  $K_c$  en fonction de l'occupation du sol

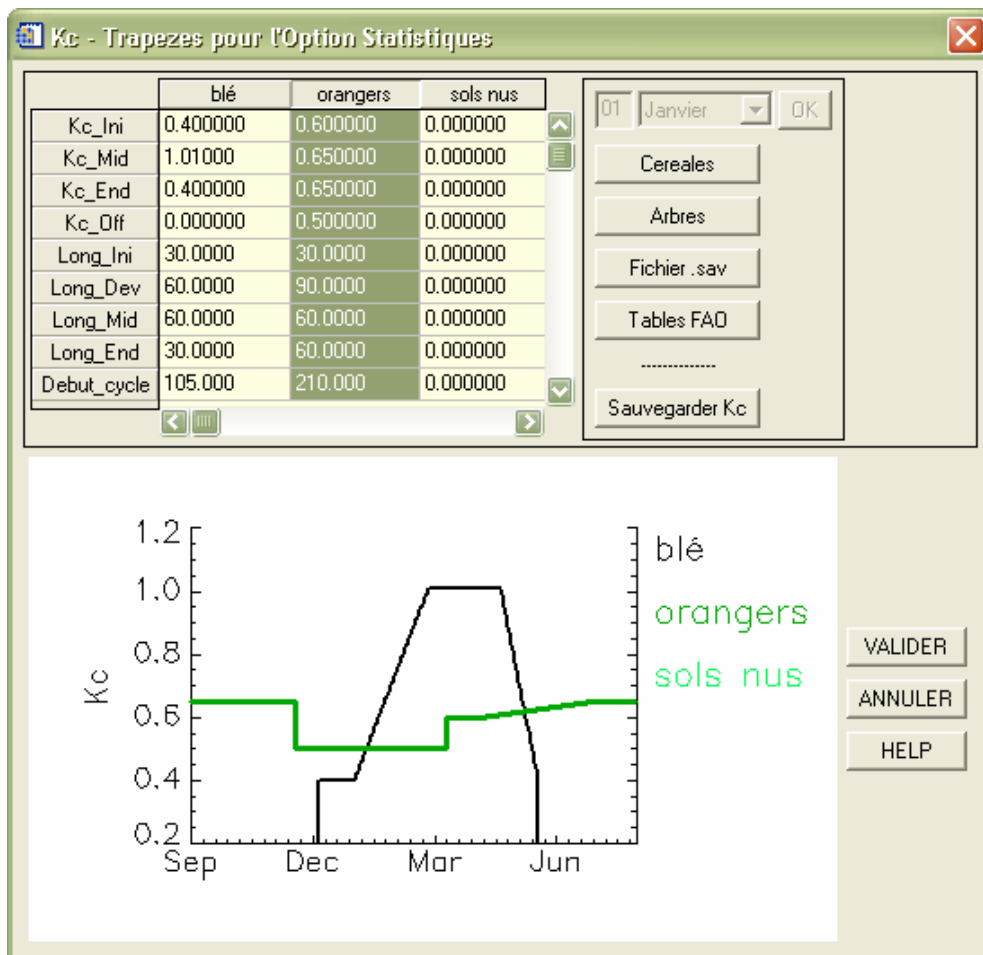


Figure 25. Exemple de  $K_c$  statistique

Le calcul de  $K_c$  avec la série temporelle NDVI peut se faire selon le mode simple ( $K_c$ ) ou dual ( $K_c$  et  $F_c$ ). Il permet également le passage de données ponctuelles vers des données journalières. Il s'agit d'assigner une relation entre la valeur de l'indice de végétation NDVI et le coefficient cultural  $K_c$  suivant les classes d'occupation du sol, et une relation entre le NDVI et le taux de couverture végétale (Fraction Cover :  $F_c$ ). Ensuite valider à l'aide de l'interpolation temporelle (figure 26) :

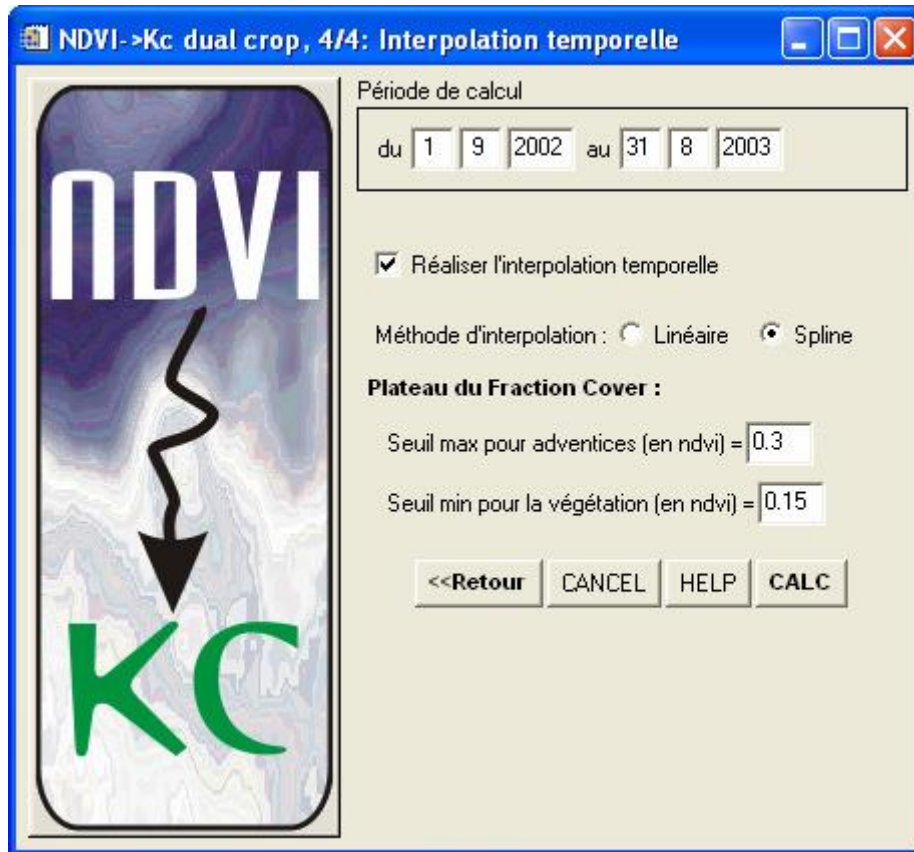
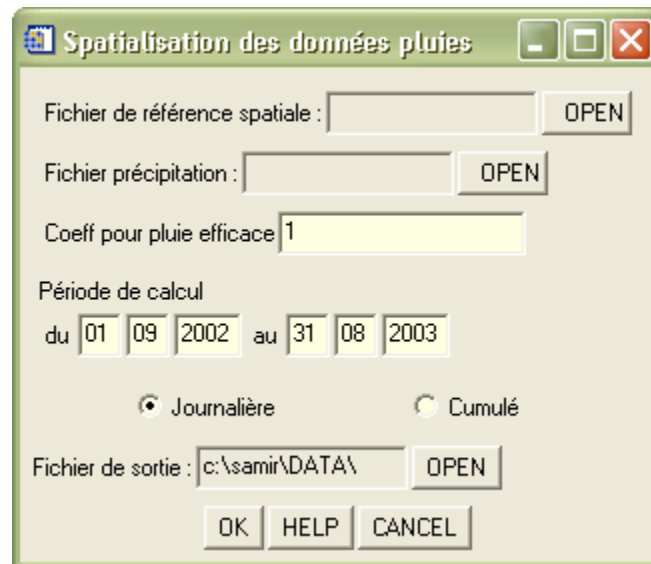


Figure 26. Configuration de  $K_c$  à partir d'NDVI et interpolation journalière

#### 4.2.4 Les données d'apport en eau

Les données de précipitation peuvent provenir de deux niveaux de spatialisation : « une station » donne des valeurs de pluie uniforme et « plusieurs stations » spatialisent la pluie selon une méthode d'interpolation (figure 27).





**Figure 27.** Spatialisation des pluies

Pour l'irrigation, il s'agit de fournir les données sous forme d'un fichier vectoriel puis de lier les informations (tour d'eau en fonction de l'état hydrique du sol, cultures à irriguer en fonction de l'occupation du sol, début et fin de l'irrigation soit en fonction de NDVI ou en fonction du cycle végétatif).

#### **4.2.5 Les données de pédotransfert (hydrodynamique du sol)**

Le sol peut être configuré soit par un compartiment moyen, soit par un fichier spatialisé. La hauteur totale du compartiment est exprimée en millimètres, le compartiment sol étant séparé en trois compartiments fonctionnels :

- Le compartiment d'évaporation : on définit sa hauteur totale en mm. La FAO recommande d'établir cette hauteur entre 100 et 150 mm (Allen et al., 1998). Le processus d'évaporation change à partir d'un certain seuil, celui-ci est appelé la capacité facilement utilisable pour l'évaporation (Readibly Evaporable Water, REW). Il est décrit dans la table 19 de la FAO. Avant ce seuil, l'évaporation se produit facilement, le coefficient de réduction de l'évaporation  $K_r$  est égal à 1 dans l'équation  $K_e = K_r ((K_c \text{ max} - K_{cb}))$ . Après ce seuil,  $K_r$  diminue graduellement en fonction de l'eau disponible dans le compartiment.
- Le compartiment racinaire : sa hauteur dépend du développement racinaire, une profondeur maximale en millimètres qu'atteignent les racines suivant l'occupation du sol, ainsi un enracinement minimum est également prévu.
- Le compartiment profond : il représente le drainage profond. Le flux diffusif exprime les remontées capillaires, et il est calculé entre chacun des compartiments à l'aide du coefficient de diffusion, exprimé en mm/jour.

La valeur d'initialisation de l'humidité relative est en pourcentage [0-100%] qui exprime la teneur en eau du sol au début de la saison. En cette période, si les sols ou les cultures reçoivent une irrigation, on peut considérer généralement un coefficient de 100%.

Enfin, deux variables définissent les caractéristiques de rétention d'eau du sol, la capacité au champ (field capacity,  $\theta_{fc}$ ) et le point de flétrissement (wilting point,  $\theta_{wp}$ ).

- La capacité au champ représente la quantité d'eau qu'un sol bien drainé retient contre les forces gravitaires, c'est-à-dire la quantité d'eau qui reste dans le sol lorsque le drainage descendant a diminué significativement.
- Le point de flétrissement permanent représente la quantité d'humidité dans le sol pour laquelle la plante ne peut plus extraire d'eau et se flétrit.

Les valeurs  $\theta_{fc}$  et  $\theta_{wp}$  ne sont pas connues à l'échelle parcellaire, elles sont décrites pour 9 types de sols dans la table 19 de la FAO (Allen et al., 1998).

La figure suivante (20) illustre la configuration de l'hydrodynamique Sol-Plante :

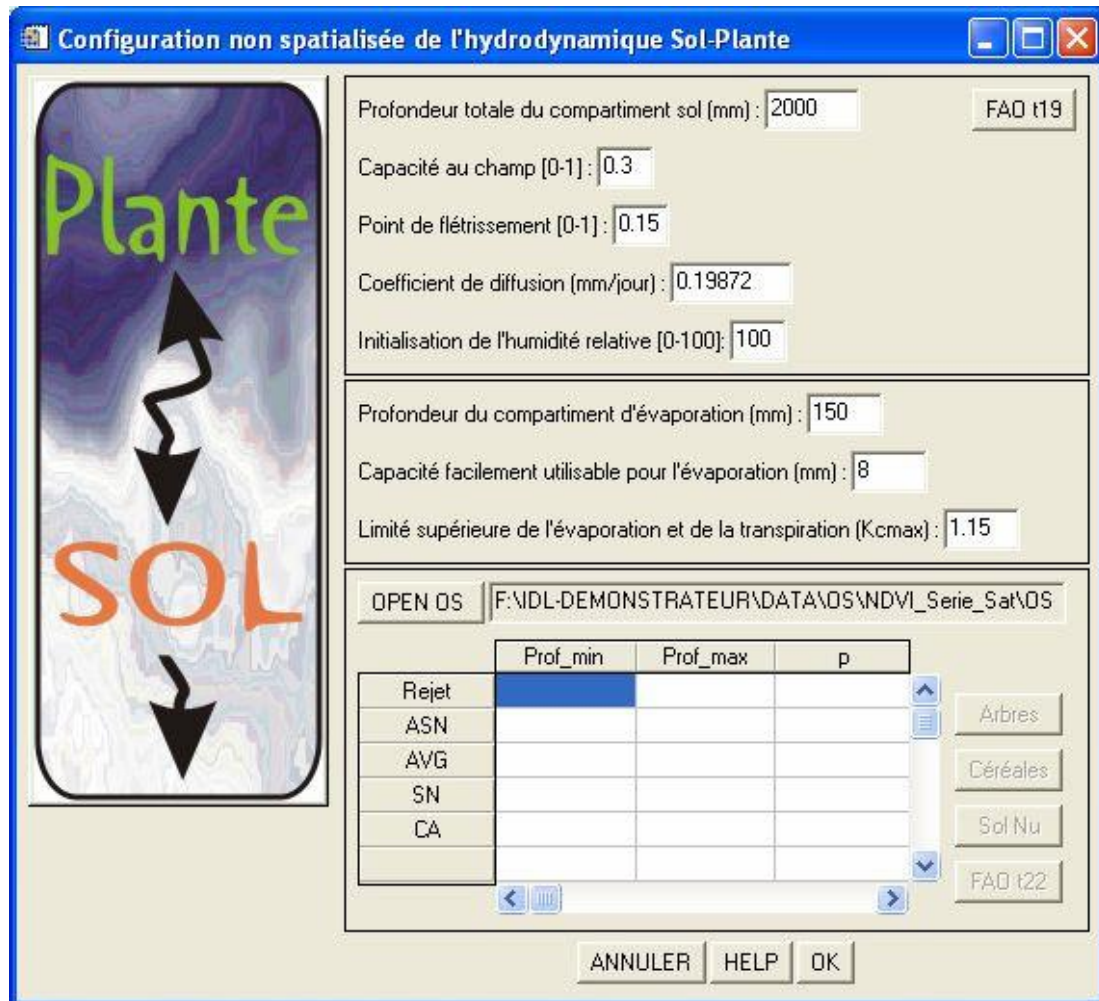


Figure 28. Configuration de l'hydrodynamique Sol-Plante

### 4.3 Bilan hydrique, ETR (évapotranspiration réelle)

L'équation avec laquelle SAMIR calcule le bilan hydrique pour chaque pixel de la carte d'occupation du sol est la suivante :

$$I+R \text{ (apports)} - D_p + ET \text{ (sorties)} = DW \text{ (variation de stock)} \quad \text{Equation (16)}$$

Où :

I, R représentent l'irrigation et la pluie.  $D_p$  et ET représentent le drainage profond au-delà de deux (2) mètres et l'évaporation réelle. DW est la variation de la teneur en eau du sol.

A partir de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) basée sur la méthode de la FAO-56, l'évapotranspiration réelle des végétaux peut être calculée par le biais de la formule suivante :

$$ETR = ET_0 * (K_{cb} * K_s + K_e) \quad \text{Equation (17)}$$

Avec :

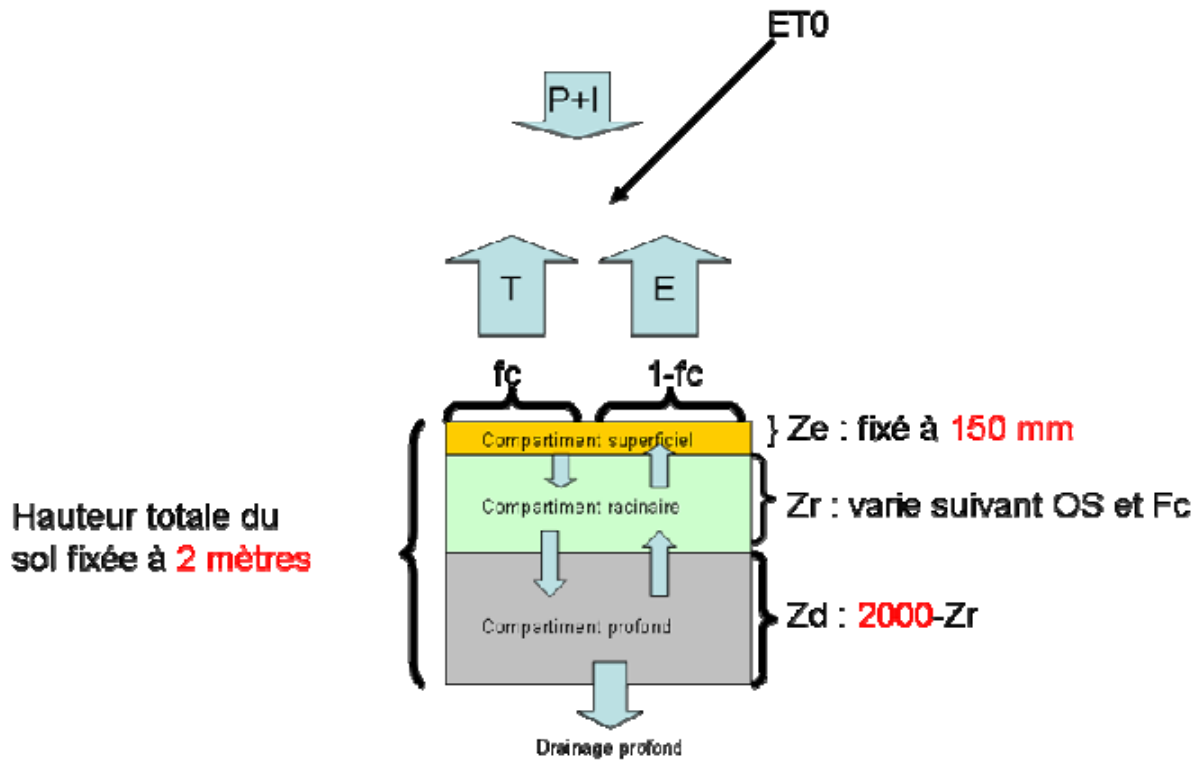
- $K_{cb}$  coefficient basal crop, déterminant la transpiration culturale ;
- $K_e$  coefficient de l'évaporation de la fraction de sol nu ;
- $K_s$  coefficient de stress hydrique, calculé à partir de l'état hydrique du compartiment sol et l'évaporation maximale végétale en conditions favorables.

On considère que les trois compartiments du sol sont remplis ( $K_s = 0$ ), et vides à ( $K_s = 1$ ). Le dessèchement de ces trois compartiments est supposé linéaire, ce qui permet au modèle de sol de Zhang d'ajuster le coefficient  $K_e$  en fonction de  $K_s$ .

Ainsi, le modèle SAMIR permet de simuler les irrigations sur la base de la variation du stock en eau pour chaque pixel de l'occupation du sol, en prenant en considération les données de base définies par l'utilisateur, il s'agit de :

- La teneur en eau initiale avant le commencement des irrigations ;
- La fraction mouillée du sol en fonction du système utilisé ;
- Le taux de dessèchement qui permet le déclenchement de l'irrigation ;
- Le taux de recharge en irrigation et la valeur du  $K_{cb}$  qui renseigne sur la fin du cycle végétatif et l'arrêt total des irrigations.

Le calcul de l'état hydrique du sol journalier à partir des données climatiques et d'échange de flux d'eau à travers une colonne de sol fonctionne suivant ce schéma :



**Figure 29.** Configuration des échanges de flux d'eau sol-plante-atmosphère

En fonction du climat exprimé par  $ET_0$ , et de la couverture au sol exprimée par  $F_c$ , nous calculons les sorties d'eau du système (Transpiration, Evaporation et Drainage profond). Les apports en eau doivent être connus pour les pluies. Par contre les irrigations sont soit un intrant connu, soit simulées par le programme en se basant sur la règle du stress de la plante.

L'évaporation s'effectue uniquement sur la couche superficielle de hauteur  $Z_e$  et de surface  $1-F_c$ , alors que la transpiration s'effectue en fonction du  $K_c$  sur la surface couverte par la plante ( $F_c$ ).

SAMIR affiche les résultats du bilan hydrique sous forme de Graphique, image et tableaux (résumé) (figure 30). Le graphique supérieur renseigne sur l'évolution des paramètres climatiques et phénologiques, le graphique inférieur renseigne sur l'évolution de la teneur en eau des trois compartiments. Enfin un résumé est affiché, il est possible d'avoir les résultats sous des tableaux Excel.

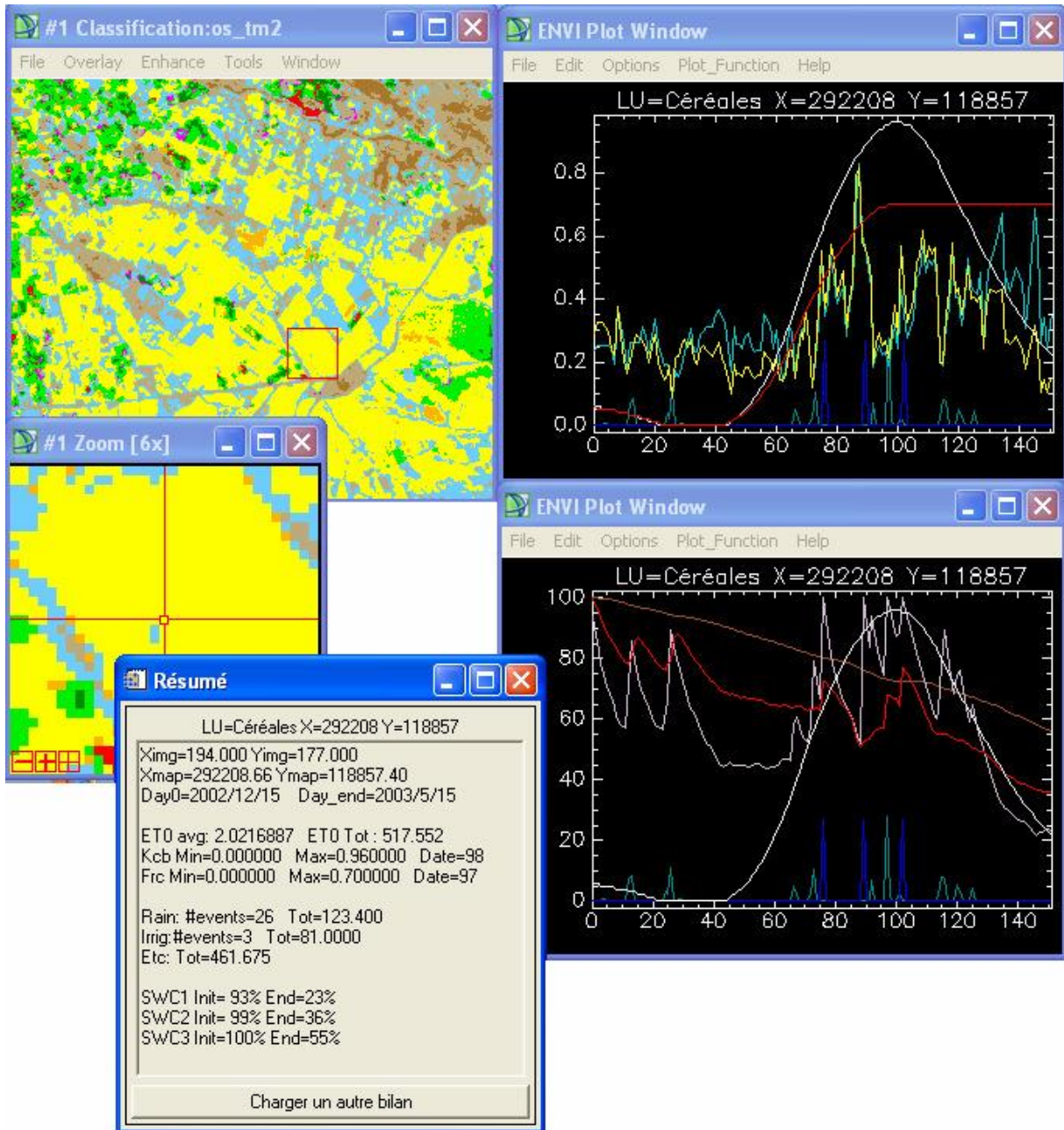


Figure 30. Résultat du bilan hydrique



## 4.4 Cas de parcelle d'agrumes au nord de la Macta

### 4.4.1 Matériel et méthode

#### 4.4.1.1 Aire d'étude

Situé dans l'ouest algérien (figure 31), le bassin versant de la Macta est compris entre la latitude  $34^{\circ} 28'$  et  $35^{\circ} 87'$  Nord et la longitude  $0^{\circ} 52'$  et  $1^{\circ} 2'$  Ouest. Il est drainé par deux principaux cours d'eau : oued El Hammam drainant le versant nord-est de l'Atlas Tellien, et oued Mebtouh à l'ouest. Le climat dans la région d'étude est semi-aride méditerranéen. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 260 mm (Gliz et al., 2015). La pénurie de l'eau constitue un problème essentiel pour les vastes plaines agricoles situées dans cette zone. Les conditions climatiques arides et semi-arides ont pour conséquence une forte irrégularité spatio-temporelle de la ressource en eau (Chibane et al., 2015). Ce qui place la gestion rationnelle de l'eau d'irrigation dans son degré d'importance primordiale afin de répondre d'une manière durable aux besoins en eau des usagers agricoles.

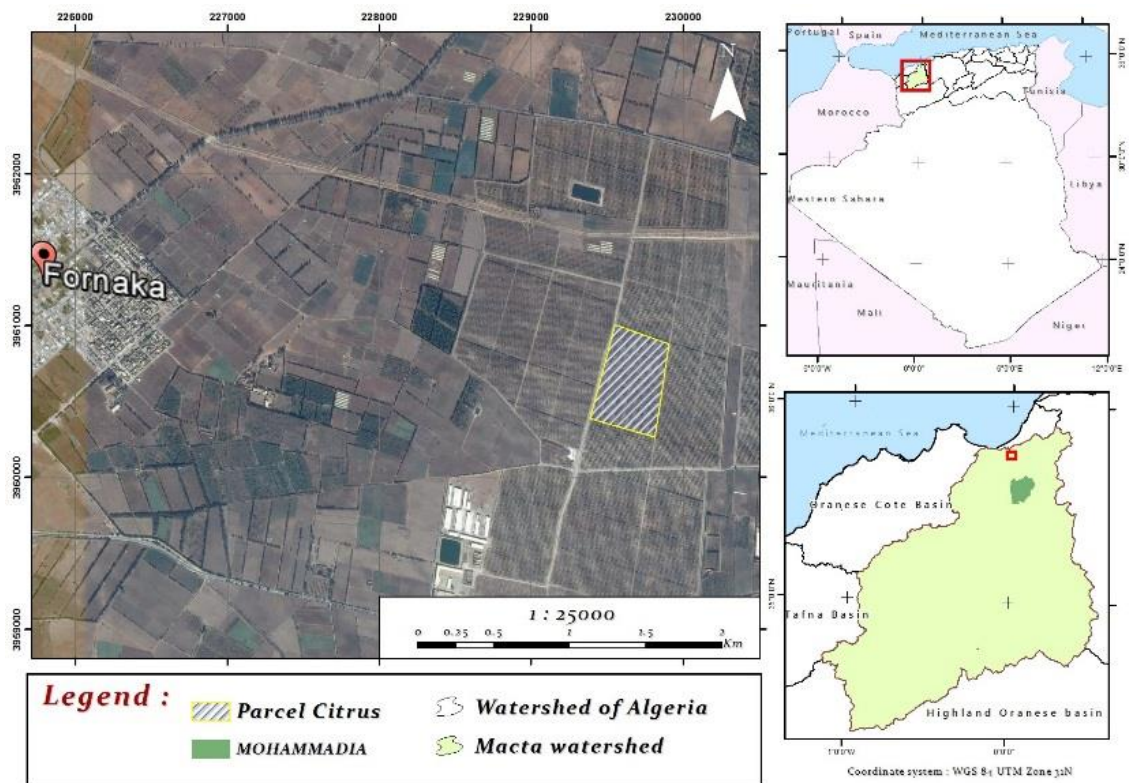


Figure 31. Situation géographique de la zone d'étude

#### 4.4.1.2 Modélisation par SAMIR

L'estimation du bilan d'énergie de la surface du sol dans le but d'en fournir l'information continue de l'évapotranspiration et le suivi du bilan hydrique du végétal demeure insuffisante (Bastiaanssen, 2000 ; Danelichen et al., 2014). Le recours à l'interpolation modélisée de l'évapotranspiration à l'aide de modèles intégrant les caractéristiques végétales est

indispensable. Les modèles SVAT (Sol Végétation Atmosphère Transfert) tels que BUDGET et GAPS permettent le calcul du bilan hydrique des cultures, toutefois leur alimentation en données est complexe comparé au modèle CROPWAT de la FAO (Clarke et al., 1998).

Le projet DEMETER développe un modèle d'aide au pilotage de l'irrigation basé sur l'estimation de l'évapotranspiration par la méthode FAO-56 et l'utilisation des images satellitaires (Calera Belmonte et al., 2005). D'autres modèles intégrant l'eau du sol sont proposés, mais sont plus complexes, du fait qu'ils sont basés sur la division du sol en trois compartiments superposés (Zhang e Wegehenkel, 2006). Les images satellitaires renseignent sur le développement réel de la végétation par le biais de l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Ce dernier est bien corrélé à l'activité photosynthétique des végétaux, et déterminant des besoins en eau des cultures et de l'évapotranspiration (Simonneaux et al., 2009).

Développé dans le cadre du projet SudMed, l'outil informatique SAMIR (SATellite Monitoring of Irrigation) est un modèle de gestion des irrigations, basé sur l'imagerie satellitaire et permet l'interpolation spatialisée des évapotranspirations et du bilan hydrique des cultures.

#### **4.4.1.3 Application du modèle SAMIR au site d'étude**

L'étude expérimentale menée dans la plaine littorale de la Macta est basée sur l'utilisation de onze (11) images Landsat TM sur une période d'observation annuelle, s'étalant du mois de mai 2015 à mai 2016, couvrant une parcelle d'agrumes de 20 hectares.

Le choix de cette exploitation agricole est motivé par la bonne maîtrise du système d'irrigation disposant de l'information relative aux consommations en eau par pompage ainsi que des sondes de mesure d'humidité du sol et un enregistrement automatique des données des pompages de l'eau des puits utilisés (figure 32 et 33). La validation des résultats obtenus par simulation est faite par simple comparaison au volume d'eau utilisé par l'irrigant à l'échelle annuelle dans son exploitation agrumicole, ces données étant jugées fiables, du fait que, l'irrigant utilise des programmeurs de contrôle, de gestion et d'enregistrement des volumes d'irrigation de marque NETAFIM.



**Figure 32.** Programmateur de contrôle de l'irrigation



**Figure 33.** Électrovanne de contrôle de l'irrigation

La comparaison effectuée entre les pompages réels fournis par l'irrigant et les pompages simulés par SAMIR laisse apparaître un niveau de pertinence appréciable de l'approche pour l'estimation quantitative des pompages de l'eau des nappes, information souvent difficile à quantifier (Faysse et al., 2011).



Les images satellitaires ont servi pour le calcul des indices de végétation NDVI, sachant que l'occupation du sol comprend uniquement l'arboriculture (agrumes), dont les valeurs NDVI varient de 0.24 à 0.38. Fc mesuré in situ, est de l'ordre de 12% de la surface du sol, la relation entre Fc et NDVI est considérée linéaire (Bezerra et al., 2010 ; González-Piqueras, 2006). Selon González-Piqueras (2006), le facteur de la couverture végétale peut être calculé par la formule suivante s'il est inférieur à 80% :

$$F_c = 1.19 (NDVI - NDVI_s) \quad \text{Equation (18)}$$

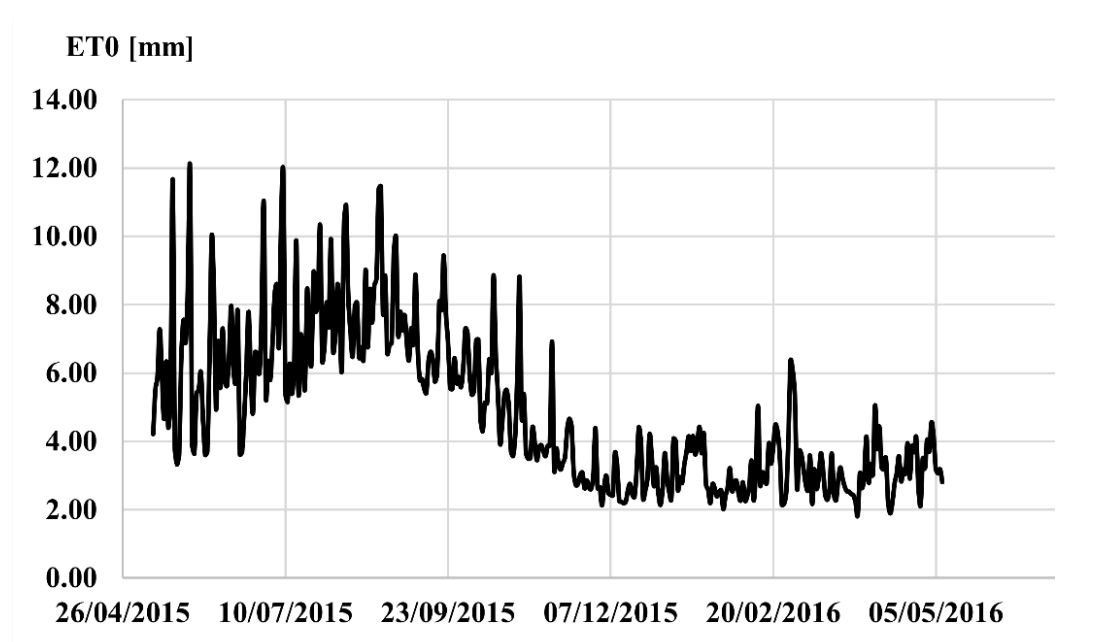
Où :

NDVI<sub>s</sub>, correspond au NDVI d'un sol nu, estimé à 0.14 (González-Piqueras, 2006).

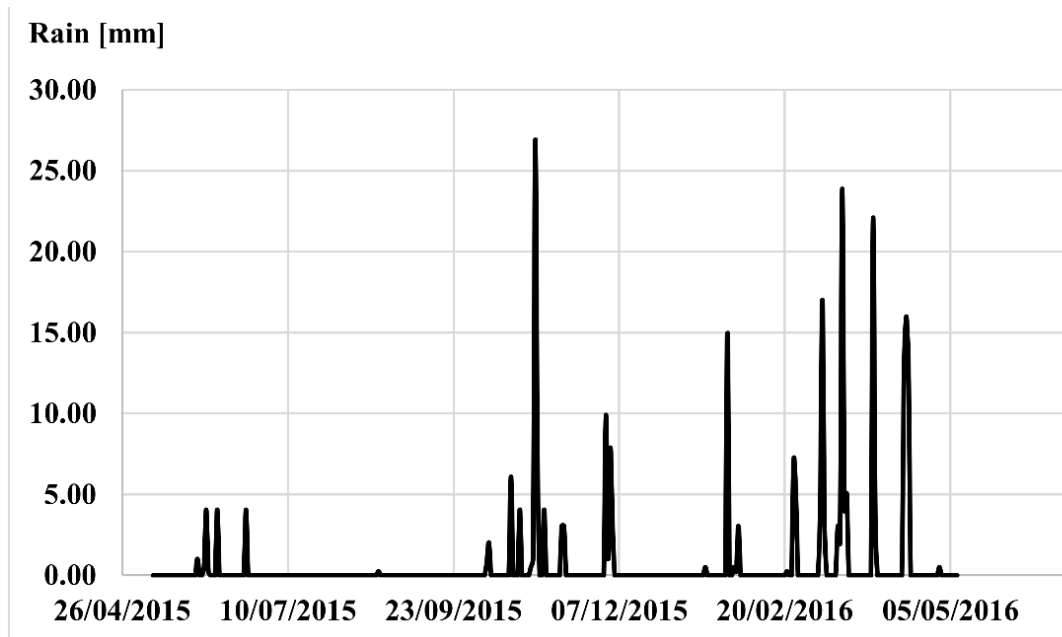
La variation de K<sub>cb</sub> en fonction de Fc est déterminée par la relation de la méthode FAO-56 suivante :

$$K_{cb} = (0.3026 * F_c) + 0.4421 \quad \text{Equation (19)}$$

L'évapotranspiration et les pluies utilisées (figure 34 et 35) sont celles issues de la station météorologique de Mostaganem la plus proche du site d'étude, située au nord de la Macta. Elles sont considérées comme étant des données de base d'entrée du modèle SAMIR.



**Figure 34.** Evapotranspiration issue de la station de Mostaganem. Mai 2015-Mai 2016 (ONM, 2016)



**Figure 35.** Pluviométrie issue de la station de Mostaganem. Mai 2015-Mai 2016 (ONM, 2016)

Les deux figures 34 et 35, montrent un déficit hydrique pendant la période étudiée, entraînant le modèle SAMIR dans une répétition successive d'irrigation afin de compenser ce déficit. La validation est laissée en fin de cycle, faite par la comparaison entre l'estimation des irrigations simulées par le modèle et les irrigations réelles totales.

#### 4.4.1.4 Détermination des performances du modèle

L'ajustement des paramètres servant de base de données d'un modèle, se fait dans le but de valider et de caler ce dernier par l'obtention de solutions simulées proches d'une façon optimale des données observées (Abrishamchi et al., 2007). Les critères de performance peuvent être simples (rapport entre débits simulés et observés), et peuvent être estimés statistiquement à travers des calculs des indices de performance (Koffi., 2007).

Selon (Miossec, 2004), les critères d'évaluation ne sont pas universels, le principe étant de comparer les débits simulés face aux débits observés. Dans cette étude nous avons utilisé les critères suivants :

##### 4.4.1.4.1 L'erreur quadratique moyenne RMSE

$$RMSE = 1/n \left\{ \sum ((v_{o_i} - v_{s_i})/v_{o_i})^2 \right\}^{0.5} \quad \text{Equation (20)}$$

Où :

- n : le nombre d'observation ;
- $v_{o_i}$  : volume observé i ;
- $v_{s_i}$  : volume simulé i.

#### 4.4.1.4.2 Index of agreement « d »

Willmot (1985) a cherché à surmonter l'insensibilité des corrélations entre les valeurs observées et simulées par le modèle, en développant l'indice d'accord « d », donné par :

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((Ob_i - Si_i))^2}{\sum_{i=1}^n (|Si_i - mOb| + |Ob_i - mOb|)^2} \quad \text{Equation (21)}$$

Cet indice varie de 0,0 à 1,0. L'unité indique un meilleur accord entre le modèle et les observations, son interprétation étant similaire au coefficient de détermination R<sup>2</sup>.

#### 4.4.1.4.3 Ratio : volume observé/volume simulé

Selon Berthier (2005), les indices utilisés pour la détermination des critères de performance des modèles de simulation sont limités dans le cadre d'une utilisation pratique, il est donc plus approprié de calculer les erreurs en faisant le rapport débit observé/débit calculé.

La figure (36) suivante illustre la méthodologie appliquée dans cette étude.

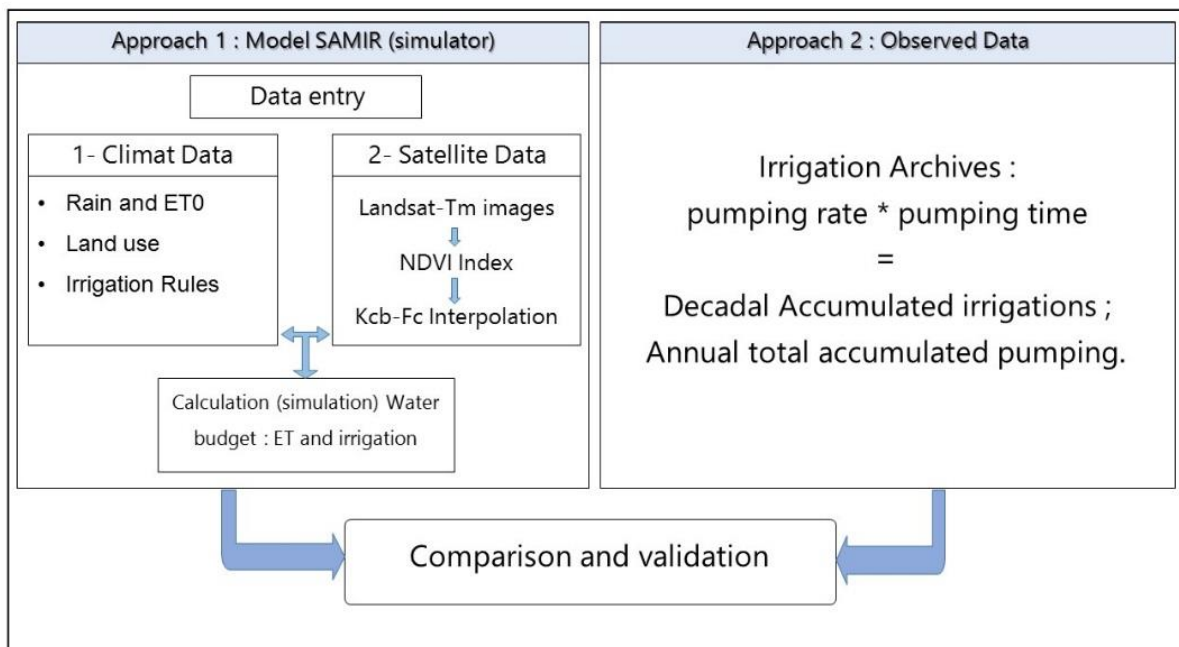


Figure 36. Schéma de l'approche utilisée dans cette étude

## 4.5 Résultats et discussion

### 4.5.1 Estimation de l'irrigation

Le cumul des irrigations simulées par le modèle pour cent soixante-six irrigations s'élève à 138782m<sup>3</sup>, tandis que l'irrigant a utilisé 135688.5m<sup>3</sup>, soit 2.3% de moins par rapport au modèle (figure 37). Nos résultats montrent une légère surestimation des valeurs simulées basée sur la méthode FAO-56, selon Toureiro et al. (2016), la même méthode surestime les besoins en irrigation d'environ 20% dans le cas de la culture du maïs sous climat méditerranéen. Notre étude, menée sur une monoculture pérenne (agrumes), a fourni une meilleure précision. Même

si les méthodes de la télédétection restent muettes et ne fournissent pas l'information sur l'usager et l'emplacement des captages (Wada et al., 2010), leur coût économique est 60 fois inférieur à celui des méthodes directes (Castaño et al., 2010).

L'usager agricole suit la logique de l'irrigation par pallier sur une large période afin de limiter les interventions sur ces équipements de contrôle et de pilotage des irrigations. Notre étude se base sur l'observation des irrigations réelles sans aucun ajustement, contrairement aux travaux de Castano et al. (2010) où l'ajustement des besoins en eau théoriques est fait à l'aide du coefficient de correction (Cc), dont les résultats montrent une performance de 95%. Nous remarquons sur la figure (38) que l'irrigation pratiquée réellement pour la période étudiée, s'étend sur cinq paliers différents suivant les saisons. Ces paliers sont comme suit : 828m<sup>3</sup>, 931m<sup>3</sup>, 828m<sup>3</sup>, 724m<sup>3</sup> et 828m<sup>3</sup>, sachant que le débit de pompage est de 57l/s.

La même figure (38), montre les fluctuations des irrigations simulées par le modèle, issues d'un programme générant des apports en eau pour couvrir un stress dans les conditions idéales (stress nul). Toutefois, il reste proche des paliers fournis par l'irrigant, le ratio (volume observé/volume simulé) varie de 0.76 à 1.27 (figure 39).

Cette différence s'explique par le fait que le modèle simule quotidiennement le déficit hydrique et le compense avec des apports en eau, chaque fois que le seuil critique de la réserve en eau du sol se vide. Ce seuil est déterminé par l'utilisateur, ce qui donne des fluctuations en eau non stables, alors que le pilotage réel de l'irrigation suit une logique basée sur les besoins en eau durant des périodes plus longues afin de limiter l'intervention humaine sur les équipements de gestion de l'irrigation.

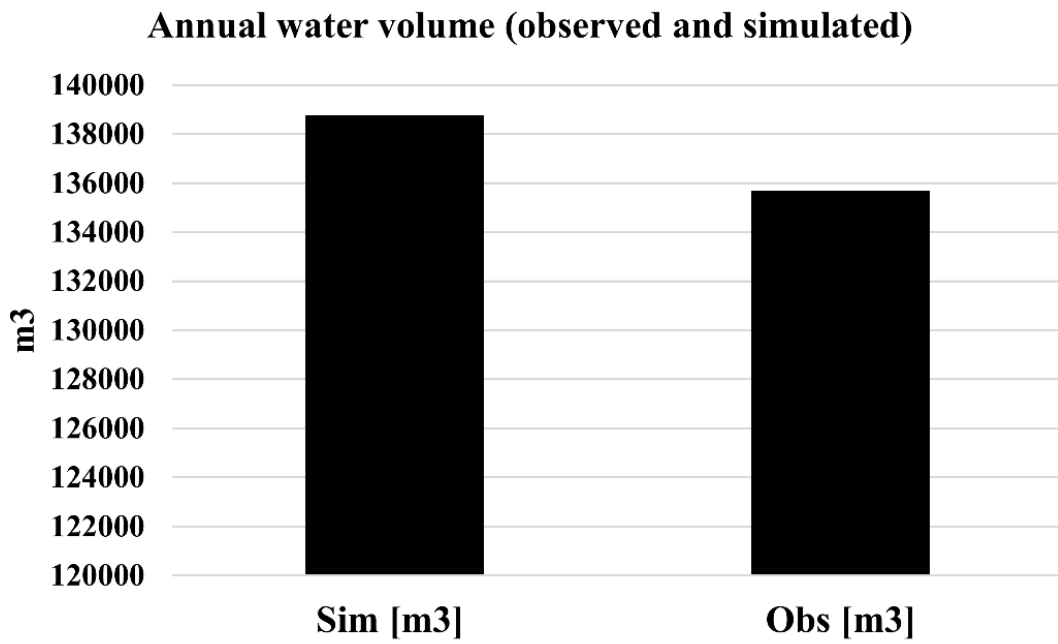


Figure 37. Volume de l'eau observé et simulé

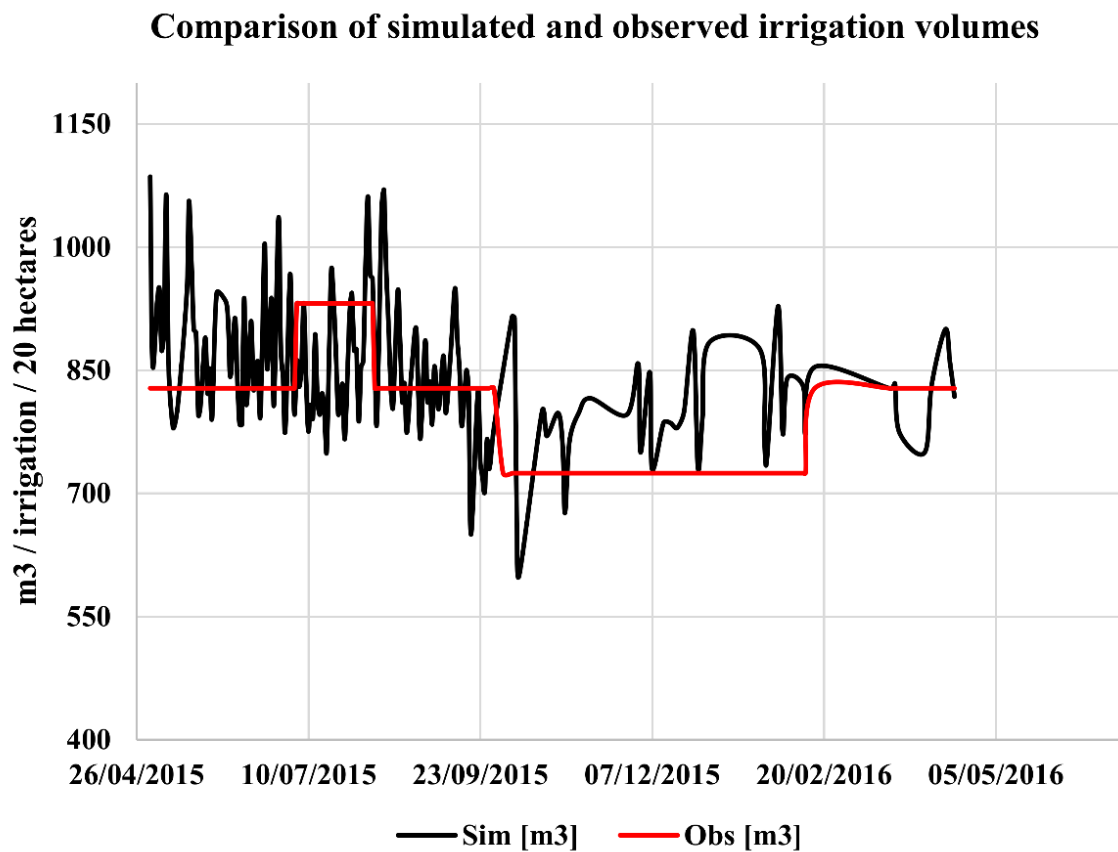


Figure 38. Comparaison entre les volumes observés et simulés

#### 4.5.2 Performance du modèle SAMIR

La corrélation est faite en comparant les pompages journaliers simulés et estimés. Le modèle se base sur une approche de remplissage de la réserve en eau en fonction des besoins en eau des cultures, ce qui entraîne des variations lors des irrigations qui peuvent être sensibles à l'échelle journalière mais faiblement sensibles à grande échelle temporelle. Le calcul du coefficient de détermination  $R^2$  conduit à un résultat mitigé, du fait de la sensibilité des fluctuations des pompages simulés par rapport aux pompages réels. Pour cela, nous avons pris en considération les indices RMSE, « d » et le ratio (volume observé/volume simulé).

Le tableau suivant montre les valeurs des indices RMSE et « d ».

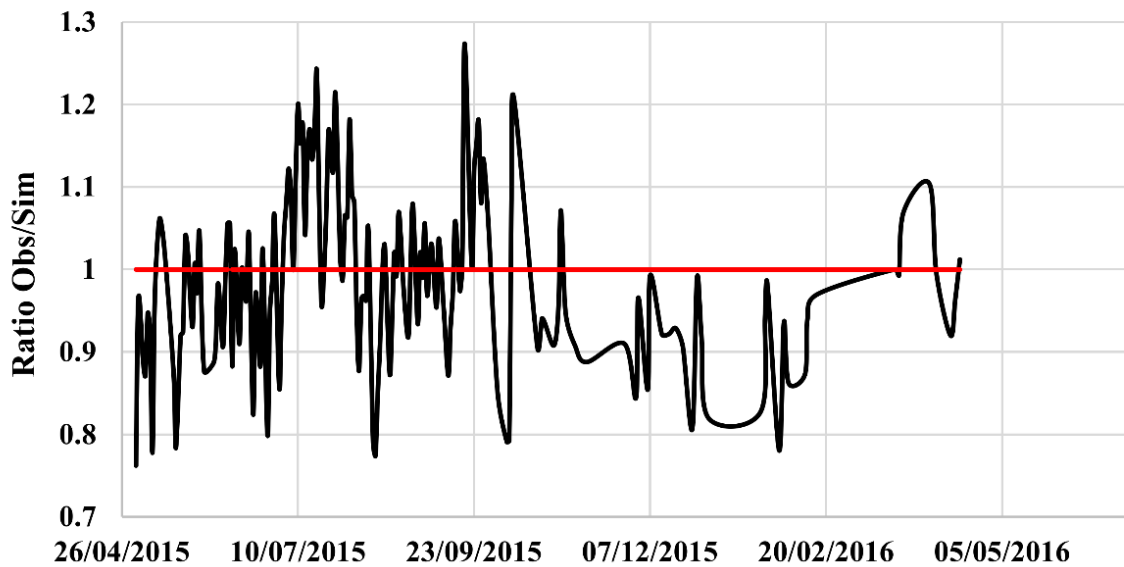
Tableau 3 : Indice statistique de performance du modèle SAMIR.

RMSE	« d » Index of agrément
0.11	80.94

La figure suivante (39) montre les différents ratios (volumes observés/volumes simulés), nous observons des variations allant de 0.76 à 1.27, ce qui vaut à des écarts allant jusqu'à 31%.

Nous enregistrons 14 simulations ayant des écarts entre 20 et 30%, 42 simulations ayant des écarts entre 10 et 20% et 108 simulations ayant des écarts inférieurs à 10%. Ce qui montre la performance du modèle SAMIR à estimer les irrigations. Tout de même, l'irrigation à l'échelle journalière reste sensible à gérer, du fait que la demande climatique journalière est variable, traduisant une oscillation des besoins en eau des cultures, ce qui rejoint les résultats obtenus par (Calera Belmonte et al., 2005), il est donc conseillé d'adopter une gestion d'irrigation hebdomadaire.

### Obs [m3] / Sim [m3]



**Figure 39.** Ratio : volume observé / volume simulé

#### 4.6 Conclusion

La disponibilité d'enregistreur numérique des volumes d'eau distribués aux parcelles irriguées a rendu la comparaison entre les pompages simulés et observés fidèle à la réalité. La différence de 2.3%, confirme la pertinence de la méthode de la télédétection à estimer les pompages en eau agricole.

L'originalité de cette approche réside dans l'intérêt du modèle à estimer les pompages en eaux souterraines sans le recours aux méthodes théoriques, elle est basée uniquement sur l'observation réelle pour une meilleure validation de l'approche.

Les besoins en eau des agrumes en conditions méditerranéennes sont en concordance avec la méthode de la FAO-56.

## **Chapitre 5**

# **Gestion concertée de l'eau des grands périmètres irrigués**



## 5.1 Introduction

Dans de nombreuses régions du monde la gestion des ressources en eau devient de plus en plus tendue à cause de pressions concomitantes : pressions démographiques, pollutions résultant des activités anthropiques, effets des perturbations climatiques. Ces tensions s'observent en particulier dans les bassins versants urbanisés et plus particulièrement en zones péri-urbaines où se confrontent usages urbains et ruraux, avec souvent des conflits socio-économiques. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) par bassin versant est souvent présentée comme un instrument capable de construire des solutions pour répondre à ces problèmes. Même si théoriquement une équipe de techniciens et chercheurs pourrait parvenir à élaborer un schéma de gestion équilibrant les divers intérêts des usagers de l'eau et les enjeux environnementaux dans un bassin versant donné, la mise en œuvre d'un tel schéma serait impossible sans l'accord et la mobilisation de l'ensemble des acteurs du territoire concerné. En réalité pour acquérir la confiance, l'enthousiasme et la ténacité d'une population pour un plan d'action quelconque, il est nécessaire de l'associer dès sa conception. L'intégration des usagers est donc un élément incontournable d'une gestion intégrée fiable des ressources en eau.

L'Algérie, étant un pays en voie de développement, subventionne considérablement l'irrigation des périmètres publics. Les droits et les redevances payés par les irrigants ne permettent pas de couvrir la totalité des coûts de distribution et de maintenance des réseaux collectifs (Imache et al. 2006).

L'Algérie, classé parmi les pays les plus défavorisés en termes de potentialités hydriques, le citoyen algérien disposant de 500m<sup>3</sup>/an, loin du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale à 1000m<sup>3</sup>/habitant/an (Loucif, 2002). Le rapport du METAP (2001) sur l'Algérie, met en évidence les pertes des allocations en eau d'irrigation par rapport à la consommation totale au détriment des autres secteurs qui ne cessent de se développer depuis les années 1960. La politique économique du pays orientée principalement vers le développement industriel et énergétique, ainsi que l'encouragement de la croissance démographique conjuguée à une baisse de la pluviométrie, conduisent à des années sèches de longues périodes, font que le rang de l'agriculture reste en troisième position.

Dans certains périmètres, là où l'eau souterraine est disponible et gratuite, elle devient de plus en plus indispensable comme dans le cas du plateau de Mostaganem et la plaine de Mascara où on enregistre des baisses d'environ 20m ces deux dernières décennies (Faysse, 2011). Dans le cas des périmètres publics où la principale ressource en eau est celle distribuée à partir des barrages, la faible tarification n'encourage pas les consommateurs à l'économie de l'eau et ne couvre pas les frais de fonctionnement des offices d'irrigation et l'entretien des réseaux de

distribution, ce qui affecte davantage l'efficacité et l'utilisation rationnelle de l'eau (Benmihoub et al., 2012).

A travers des plans de développement à l'échelle nationale, l'Etat algérien a lancé une nouvelle politique de subvention des systèmes économiseurs en eau aux profits des agriculteurs statués, dans le but de moderniser et de rendre économe la consommation en eau agricole, et par conséquent étendre les superficies irriguées (Imache, 2006). Les agriculteurs du périmètre de Habra n'ont pas adopté ces techniques pour leur majorité, car ils ne disposent pas de ressources disponibles en permanence. Le réseau collectif du périmètre permet des tours d'eau de quarante-cinq jours minimum, avec des débits de 40 litres/seconde, ce qui ne permet pas d'envisager des systèmes tel que le système localisé (goutte à goutte) qui nécessite des tours d'eau plus fréquents. L'offre en eau d'irrigation dans les GPI (Grand Périmètre Irrigué) est, en général, non garantie. La plaine de Habra fait partie de la grande hydraulique, a connue des perturbations fatales causant la mortalité de plus de 50% de ses vergers, la sécheresse qui a sévit l'Oranais, l'orientation de l'eau des barrages de l'ouest vers l'alimentation en eau potable sont les causes principales de l'état actuel de ce périmètre, ajoutant à cela la vétusté du réseau qui est efficient à 30%.

Le développement du périmètre est freiné par la diminution des allocations en eau suite à l'envasement presque total du barrage Fergoug qui constitue la principale source d'approvisionnement du périmètre, et le favoritisme accordé à l'eau potable de la région oranaise, ainsi que sa limite à introduire les techniques d'irrigation moderne tel que le système localisé (goutte à goutte).

Le présent chapitre consiste à analyser la problématique de la gestion de l'eau de la grande hydraulique à usage agricole, en prenant le cas du barrage de Fergoug et la plaine de Habra au nord de la Macta. Des enquêtes auprès des associations des irrigants et au niveau des instituts Etatiques nous permettrons de dresser un bilan de la situation réelle quant à la place de la négociation et la concertation autour d'un besoin vital et commun, et mettre en évidence l'accent sur une nouvelle approche de gestion durable de la ressource en eau.

### **5.2 Aperçu général**

Les premiers travaux entrepris par la mise en valeur du périmètre de Habra remontent à 1843. On comptait en 1862, dans la plaine de Habra, une superficie arrosée de 10000 ha avec un système d'irrigation gravitaire à sillons. L'équipement du périmètre actuel et son exploitation datent de 1940, après la mise en service du barrage de Bouhanifia construit en 1939.

Le périmètre de Habra (zone de Mohammadia) a été créé par arrêté ministériel du 19 janvier 1942 fixant sa superficie à 16800 ha pour la zone 01, et 12000 ha pour la zone 02.

A titre indicatif, la zone de Hacine, classée dans le périmètre de Habra, a été créée par le même texte et sa superficie a été fixée à 430 Ha.

Depuis la création de l'office national de l'irrigation et du drainage, le périmètre de Habra n'a jamais bénéficié d'un quota suffisant à l'irrigation de toutes les superficies irrigables. L'insuffisance de la ressource est provoquée par deux facteurs :

- 1- La sécheresse qui sévit sur la région oranaise depuis deux décennies ;
- 2- L'allocation d'eau en priorité à usage domestique (AEP).

Les volumes régularisables ne dépassent pas souvent 60Hm<sup>3</sup> et sont répartis entre l'AEP (2/3) et l'irrigation (1/3). Les quotas alloués au périmètre de Habra depuis 1986 ne dépassent guère les 32Hm<sup>3</sup>. Pendant les années de référence (1960-1962), le périmètre de Habra recevait 80Hm<sup>3</sup>/an. Durant cette période la Wilaya d'Oran était approvisionnée par d'autres sources. La réhabilitation du périmètre passe d'abord par l'amélioration de ces ressources en eau.

### **5.2.1 Exploitation du périmètre**

Le périmètre de Habra est alimenté à partir des barrages de Ouizerte, Bouhanifia et Fergoug. Les volumes alloués à l'irrigation ne cessent de régresser depuis 1977. Ils sont passés de 84Hm<sup>3</sup> pour l'irrigation de 10600 ha à 40Hm<sup>3</sup> en 1981, et à 26Hm<sup>3</sup> en 1988. Les pertes dans les réseaux sont estimées à plus de 30%, tandis que les pertes dues au transfert de l'eau du barrage Bouhanifia au périmètre sont estimées à 40%.

Durant la dernière décennie, les volumes affectés demeurent toujours faibles et n'ont guère dépassé les 32Hm<sup>3</sup>. L'année 1999 a été la plus catastrophique avec un volume de 3Hm<sup>3</sup> qui n'a permis d'irriguer que 920 ha (DREW, 2015).

Cette faiblesse de la ressource n'arrivait même pas à satisfaire les besoins de survie des plants, ce qui a entraîné le dépérissement de plusieurs centaines d'hectares. Le périmètre a été déclaré sinistré durant plusieurs campagnes.

### **5.2.2 Les exploitations**

La structure des irrigants se présente comme suit :

- Secteur Etatique : 315 EAC et EAI (exploitations agricoles collectives et individuelles) regroupant 1600 exploitants, qui se partagent une superficie irriguée de 4 968 ha, dont 4281 ha d'agrumes.
- Privé : 1285 exploitations, pour une superficie de 3995 ha, dont 2623 ha d'agrumes.

### 5.2.3 Caractéristiques de la plaine de Habra

La plaine de Habra, appelée aussi plaine de Mohammadia, est une zone d'une surface totale de 36500 ha qui regroupe une partie des terres riches cultivées et une autre partie impropre réservée aux parcours pour le cheptel.

La climatologie de la zone, favorable aux agrumes, a conduit hâtivement les colons pour s'y installer dans cette zone et à planter près de 60% de la surface irriguée du périmètre dénommant ainsi la zone « Plaine des agrumes ».

Les agrumes de Mohammadia, qui fournissaient une production avoisinant le million de quintaux pendant les premières années de l'indépendance et dont un grand volume était exporté, constituaient pour le pays une source de rentrée de devises non négligeable et financaient en partie le développement de l'agriculture.

### 5.2.4 Réseau d'irrigation

D'une longueur de 251 Km, le réseau d'irrigation du périmètre est de type ramifié. Il est constitué d'une conduite principale dite «tronc commun» qui se ramifie en 6 conduites secondaires. C'est un réseau ancien présentant une dégradation avancée qui nécessite des entretiens de plus en plus importants. Les pertes dans les réseaux sont estimées à plus de 30%. L'office procède actuellement à la rénovation des conduites principales mais à un rythme très lent. En effet, seulement 4766 mètre linéaire ont été rénovés depuis 1996 à ce jour.

### 5.2.5 Les ressources en eau

Le périmètre est alimenté à partir des barrages du triplex : Ouizert, Bouhanifia et Fergoug. Les volumes attribués à l'irrigation en fonction des années pluviométriques sont représentés dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Volume d'eau attribué, et surface irriguée dans le périmètre de Habra

Année	Volume d'eau Hm <sup>3</sup>	Surface irriguée ha
1978	84	10650
1981	40	11800
1987	26	6700
1988	4.6	3700

La dose d'irrigation du périmètre a variée de 7800m<sup>3</sup>/ha/an à 2800m<sup>3</sup>/ha/an. L'année 1988/1989 enregistre le plus faible volume estimé à 4.6Hm<sup>3</sup> pour la totalité du périmètre, mais qui a permis l'irrigation que de 3700ha.

### **5.2.6 Les contraintes du périmètre**

Les superficies irriguées restent très faibles par rapport aux superficies équipées. Les raisons sont de diverses natures, entre autres :

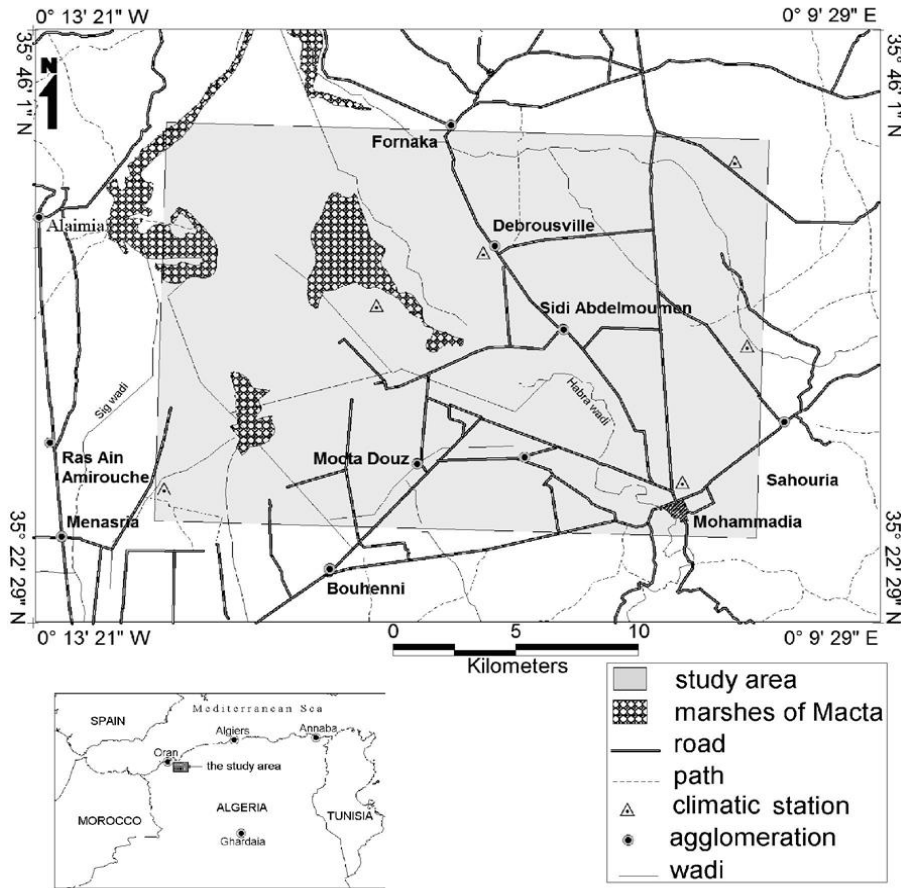
- Les capacités de transport des canaux sont réduites à plus de 50% à cause de leur dégradation, ce qui oblige l'office de l'irrigation de ne solliciter que les quotas en eau modestes (30Hm<sup>3</sup>) pour une campagne dont la durée est de 6 mois ;
- La limitation des débits transportés ne permet pas à l'office de l'irrigation de distribuer les volumes nécessaires permettant l'équilibre de la situation financière, et par la même occasion d'améliorer la qualité de leurs prestations par un meilleur entretien du réseau ;
- La vétusté du réseau impose un entretien de plus en plus onéreux et ne laisse aucune possibilité de prendre en charge d'autres opérations utiles telles que l'appui à la production agricole ou l'introduction d'autres techniques d'irrigation ;
- Priorisation de l'offre potable au détriment de l'agriculture ;
- Envasement des barrages, l'absence d'entretien des cuvettes a provoqué l'envasement progressif de ces retenues. C'est ainsi que la capacité du barrage de Bouhanifia est passée de 72 à 38Hm<sup>3</sup>, celle de Fergoug a diminué de 17 à 0,5Hm<sup>3</sup> ;
- La tarification, les nouveaux tarifs de l'eau brute destinée à l'irrigation (1.20 à 2.50 DA/m<sup>3</sup>) restent faibles et évoluent très lentement.

## **5.3 Matériels et méthodes**

### **5.3.1 Présentation de la zone d'étude**

La plaine de Habra (figure 40) est une plaine sub-littorale, située à l'ouest de l'Algérie. Elle bénéficie d'un climat méditerranéen favorable à l'activité agricole. La plaine de Habra doit sa richesse à plusieurs facteurs :

- Longue expérience de l'arboriculture irriguée (depuis 1940) ;
- Situation à proximité de grande ville telle qu'Oran ;
- Présence d'infrastructures routières bien développées ;
- Forte implantation d'unités de transformation agro-alimentaire ;
- Des sols sablo-limoneux, fertiles, de faible salinité, perméables, riches avec une bonne aptitude à l'irrigation ;
- Présence des institutions de recherche et de développement agricole ;
- Présence de potentialités en eau importantes.



**Figure 40.** Localisation géographique du périmètre Habra (Khaldi et al., 2011)

Le périmètre est composé de deux parties, celle de Hacine située entre les barrages de Bouhanifia et Fergoug qui s'étend sur une superficie de 730ha, celle de Mohammadia avec une superficie de 19610ha, ayant pour spéculation principale l'orange Washington Navel. Au début des années 1960 elle faisait l'objet de l'exportation d'un million de quintaux par an.

### 5.3.2 Choix de la zone

Le périmètre de Habra est un périmètre relativement ancien, il date de l'ère coloniale, malgré cela, peu d'études portant sur la gestion de son eau d'irrigation ont été menées. Les barrages qui assurent sa disponibilité en eau sont quasiment envasés, le réseau de distribution de l'eau est dans un état de détérioration avancé, le périmètre compte plus de 50% de dépérissement de ces vergers, s'ajoute à cela le risque de salinisation due à la qualité de l'eau saumâtre de la nappe.

Après la mise en eau de la station de dessalement d'Oran en 2013, les barrages qui alimentaient autrefois le périmètre sont maintenant soulagés et peuvent réalimenter à nouveau le secteur agricole après leur orientation vers l'eau potable de la ville d'Oran.

Durant ces dernières années nous avons constaté un recours aux plantations de jeunes vergers dû essentiellement à l'augmentation des quotas en eau alloués à l'irrigation du périmètre, bien que la majorité des agriculteurs estiment que ces quotas ne suffisent même pas aux vergers déjà existants. L'Etat algérien accorde à ce périmètre d'importants budgets de rénovation et de remise en valeur, ce qui le place au premier rang des cas à étudier.

### **5.3.3 Protocole d'enquêtes**

La première étape de l'enquête s'est concentrée sur la collecte de données auprès des administrations agricoles et hydro-agricoles en lien avec le périmètre irrigué de Habra, il s'agit de l'institut technique de l'arboriculture et de la vigne (ITAFV), et de l'office national de l'irrigation et de drainage (ONID). Cette étape nous a permis de dresser une caractérisation typologique des exploitations agricoles (superficie, âge des vergers, quotas en eau demandés et distribués, membre dans une association d'irrigants ou pas et le mode d'accès à la ressource en eau d'irrigation). Aussi, l'enquête auprès de ces instituts nous a permis de comprendre l'approche globale adoptée dans la distribution de l'eau à l'échelle du périmètre de Habra.

Selon (Labbé et al., 2000), en prenant en compte la diversité des pratiques culturelles, l'analyse typologique des exploitations agricoles est un moyen nécessaire permettant une meilleure caractérisation de la demande en eau au sein de l'exploitation.

Une seconde enquête a eu lieu à l'échelle de l'exploitation avec les agriculteurs irrigants, et avec le représentant des associations des irrigants qui compte plus de quatre mille exploitants inscrits au niveau de l'ONID en qualité de demandeurs de l'eau.

Cette deuxième enquête où nous intéressons à l'agriculteur lui-même, dont la décision est rarement prise en compte (De Nys, 2004) nous a révélé les discussions, les circuits et les stratégies adoptées par les agriculteurs en dehors des démarches formelles où souvent les prises de décisions se font dans les bureaux des instituts de l'Etat.

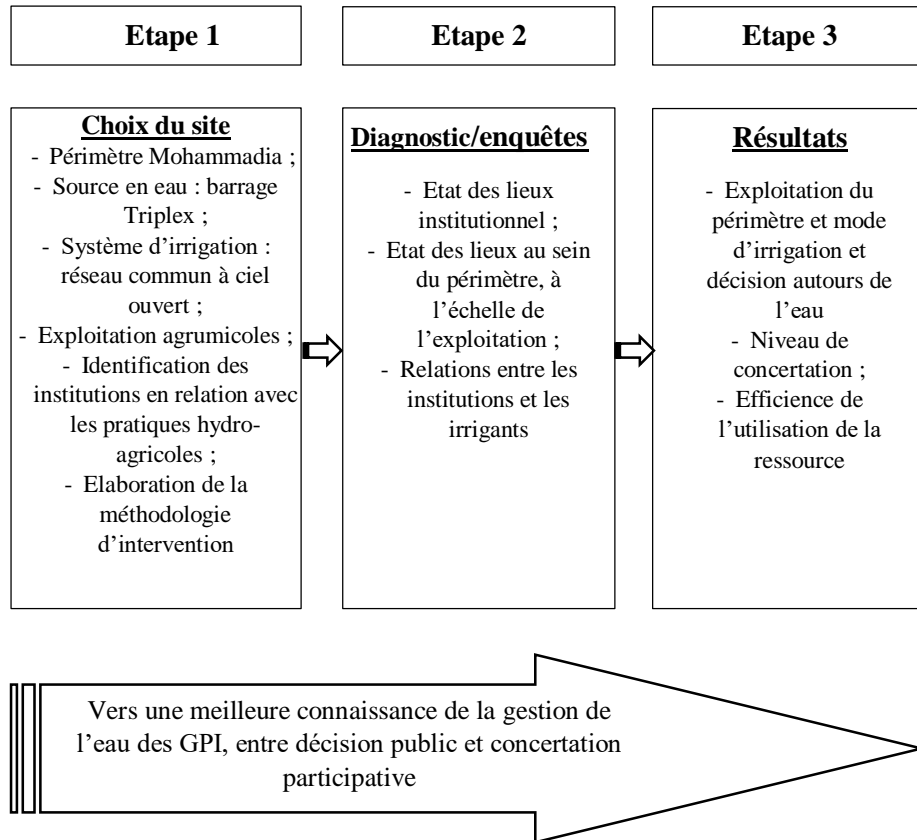
Des investigations sur terrain ont été menées en période d'irrigation (mai 2015) afin d'observer l'état du réseau d'amenée d'eau collectif en activité, et ainsi dresser une estimation qualitative sur son fonctionnement et sur le mode de partage et d'entretien pratiqué par les agriculteurs.

Il est attendu de ce chapitre, une meilleure illustration de la gestion de l'eau des GPI (Grand Périmètre Irrigué), notamment, l'eau mobilisée par les infrastructures de la grande hydraulique, et le degré de l'efficacité de son utilisation.

Il permet aussi de dresser le constat sur l'implication des usagers dans le processus de la décision de cette gestion de la ressource dans une logique de concertation partagée entre usager et détenteur de la ressource.

Enfin, l'approche adoptée pour ce chapitre nous permettra une comparaison soit avec d'autres périmètres type GPI ou encore des périmètres type PMH (Petite Et Moyenne Hydraulique) où la ressource en eau souterraine permet d'atteindre des seuils appréciables en quantité en eau d'irrigation et permet aussi l'introduction de techniques économes en eau tel que le système localisé (goutte à goutte). Ainsi, évaluer les enjeux liés à l'agriculture irriguée et à la ressource en eau considérée souvent comme source de conflit entre les différents usagers.

La figure suivante (figure 41) schématise la méthodologie d'approche adoptée pour ce chapitre.



**Figure 41.** Schéma de la méthodologie d'approche

## 5.4 Résultats

### 5.4.1 Négociation des quotas en eau

Les discussions menées avec les représentants des instituts responsables de la distribution de l'eau d'irrigation et les usagers à travers les représentants des associations des irrigants au niveau du périmètre de Habra, ont révélé que les décisions sur les volumes alloués au secteur de l'irrigation se font au niveau administratif au premier rang du secteur de l'eau (Ministère des ressources en eau). Cela dépend essentiellement de l'année hydrologique, sachant que les barrages triplex Ouizert-Bouhanifia-Fergoug, principales infrastructures desservant le



périmètre de Habra, assurent aussi l'alimentation en eau potable de la ville d'Oran, il s'agit de la priorisation domestique par rapport à l'agriculture.

Des rencontres annuelles ont eu lieu entre les irrigants et les services de l'ONID dans le but de déterminer les demandes en eau des irrigants, qui ne cessent d'augmenter en raison des adhésions continuelles dans les associations collectives. Ce qui témoigne de l'intérêt accordé par les usagers quant à leurs vergers en état de détresse depuis les années sèches de la période 1990-2001. Ces rencontres ont pour objectifs principaux :

- La détermination des surfaces à irriguer et la définition des taux d'irrigation par hectare, ainsi que la période et la durée pour chaque irrigant (tour d'eau) ;
- La lutte contre les irrigants illicites situés en amont du barrage, pratiquant des cultures spéculatives ;
- Rappeler aux décideurs, le maintien des exploitations du périmètre par leur demande en eau croissante chaque année, vue que les quotas alloués aux irrigants ne prennent pas en considération leur demande en premier lieu.

Le graphe suivant (figure 42) montre l'irrégularité de la distribution de l'eau d'irrigation faite sur la base de l'année hydrologique, la distribution de l'eau variant de 26Hm<sup>3</sup>/an à moins de 5Hm<sup>3</sup>/an :

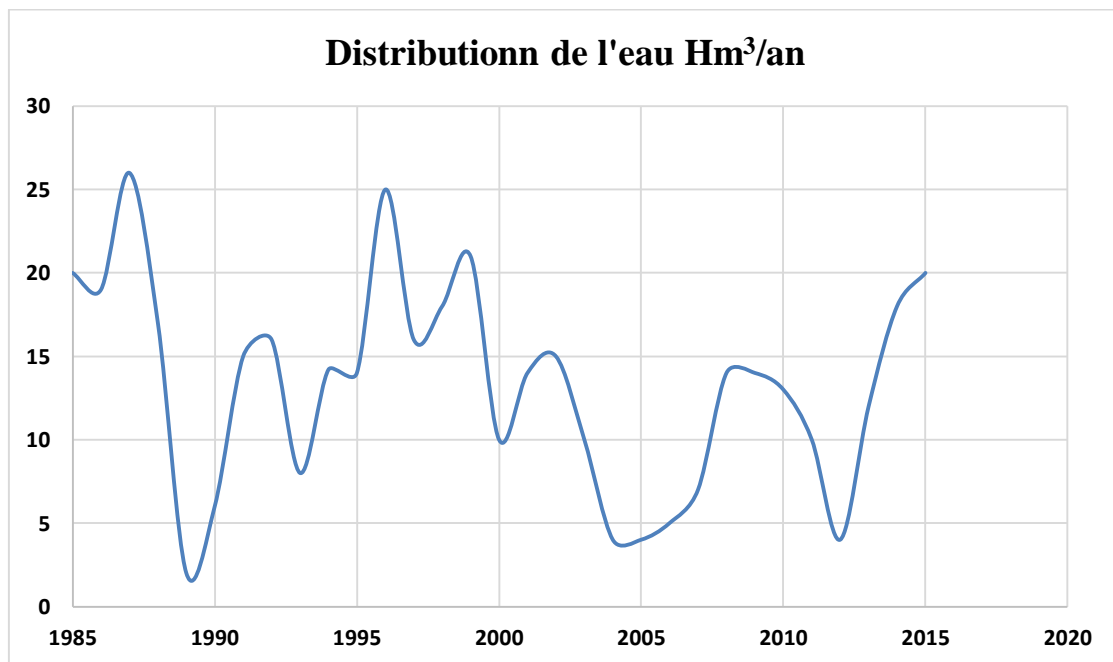
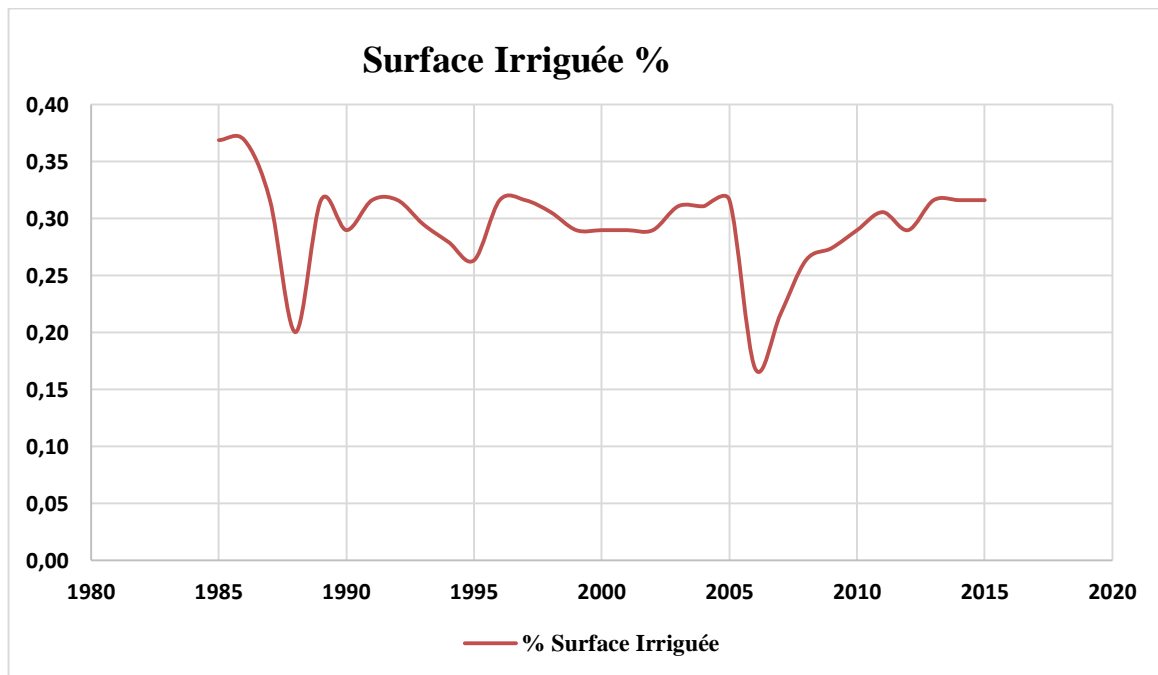


Figure 42. Distribution de l'eau d'irrigation en Hm<sup>3</sup>/an

#### 5.4.2 Conduite de l'irrigation au sein du périmètre

L'analyse des deux graphes (figure 43), montre une stabilité des surfaces irriguées de l'ordre de 6000 hectares entre 1988 et 2005, équivalent à 30% de la surface totale du périmètre. Nous

remarquerons aussi que les surfaces irriguées n'ont guère dépassé les 7000 hectares soit 35% de la surface totale depuis 1985. Nous enregistrons aussi des chutes de surface irriguées atteignant les 3000 hectares (15%) durant l'année 2006. La période 1988-2010 enregistre la période la plus sinistrée du périmètre, une réduction d'environ 50% des quantités en eau allouées à l'irrigation sont à l'origine de la diminution d'environ 1500 hectares de terres irriguées. L'état du réseau collectif du périmètre et la rareté d'autres sources, font que la gestion de l'eau au sein du périmètre suit une logique de concertation entre les quatre associations des irrigants et l'office national de l'irrigation d'une part, et d'autre part, le recours à l'achat de citerne d'eau permettant la subsistance des vergers du périmètre.



**Figure 43.** Représentation des taux de surface irriguée (%)

### 5.4.3 Adhésion et stratégie d'irrigation

Chaque année environ 2000 agriculteurs souscrivent à l'office et on retrouve deux logiques de vision « Achat-Eau », ceux qui déclarent avoir plus de superficies pour en bénéficier de plus d'eau en déboursant encore davantage. Et ceux qui déclarent avoir moins de superficies là où l'eau est desservie d'une manière assez continue (réseau transitaire) afin de ne pas payer le prix de l'eau tout en profitant des quotas disponibles au niveau du réseau principal.

L'analyse des statuts des agriculteurs irrigants du périmètre révèle que 90% pratiquent des activités hors agriculture fleurissantes, ce qui leur permet d'investir davantage dans leur exploitation même à but non lucratif, le recours à l'achat de citernes d'eau permet juste la survie des vergers agrumicoles et le maintien de leur héritage pour les générations à venir.

Pour ce qui est de l'irrigation, il faut noter que le système d'irrigation dominant dans le périmètre est la seguia (irrigation gravitaire), il est utilisé par 99% des exploitations, sans le recours au système de décantation, ce mode d'irrigation peut conduire à la diminution de la perméabilité et menace la destruction qualitative des sols du périmètre (Gliz, 2014).

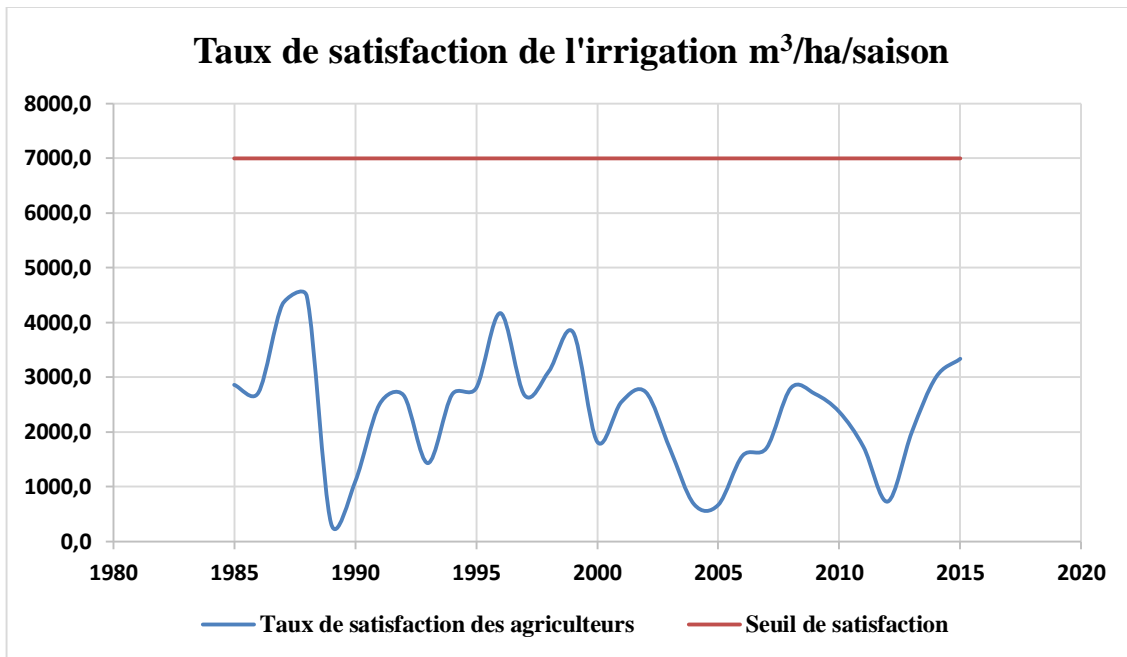
Malgré sa forte subvention durant la période du PNDA (Programme National De Développement Agricole), le système localisé (goutte à goutte) a été peu adopté, puis abandonné par la majorité des agriculteurs, car il nécessite une utilisation fréquente et une disponibilité en eau quasi permanente, alors que le tour d'eau pratiqué par l'office de l'irrigation est de 45 jours au minimum. Le système localisé (goutte à goutte) nécessite souvent des équipements et une technicité tribulaire de formation. Avec un système d'irrigation sur réseau collectif qui permet juste la survie de certains vergers, l'eau du barrage est d'une qualité très appréciée par les agriculteurs, mais reste la seule ressource de subsistance du périmètre pour la majorité, ce qui empêche les agriculteurs de se projeter et d'envisager un développement agricole durable à long terme, cette incertitude et irrégularité de la disponibilité de l'eau est à l'origine du dysfonctionnement de la gestion participative entre l'office de l'irrigation et les irrigants.

### **5.4.4 Conflit d'usage et taux de satisfaction**

La majorité des irrigants déclarent que la quantité nécessaire pour irriguer un hectare d'agrumes du périmètre Habra est de 7000m<sup>3</sup>/saison. Le graphe suivant (figure 44) montre l'écart entre les quantités d'eau desservies par l'office de l'irrigation et le seuil de satisfaction en demande en eau, sans tenir compte de l'efficacité du système seguia et de l'uniformité de la distribution de l'eau à l'intérieur de la parcelle, nous constatons déjà que dans la majorité des cas, le taux de satisfaction n'atteint pas les 50%.

Au niveau du périmètre Habra, les négociations entre les irrigants sur le partage de la ressource, les locations et les ventes des quotas personnels n'est pas envisageable, il s'agit du facteur limitant le plus recherché et la source de conflit permanent avec les agriculteurs des zones se trouvant en amont du barrage, ces derniers pompent l'eau à partir du canal pour irriguer des cultures maraichères spéculatives.

Certains agriculteurs ont recours à l'achat de l'eau par des citernes à coût relativement élevé par rapport au prix utilisé par l'office de l'irrigation mais en aucun cas ces agriculteurs n'acceptent de payer l'eau du barrage à son prix réel.



**Figure 44.** Taux de satisfaction des irrigants en eau d'irrigation

## 5.5 Conclusion

Le manque d'eau récurrent que connaît l'Algérie touche directement le secteur agricole qui vient derrière celui de l'alimentation en eau potable desservi en priorité. De ce fait, les agriculteurs doivent adopter des stratégies individuelles pour contourner le déficit hydrique. Dans certains cas, le recours à l'utilisation des eaux souterraines ou les eaux usées brutes et épurées constitue la solution garantie et sûre.

Le cas du périmètre Habra constitue un frein au développement agricole et à des visions à long terme, la quasi dépendance en eau du barrage desservie sur un réseau efficient à 30%, a fait que les surfaces irriguées sont réduites de 50% depuis les années 1980. Cela montre à quel point l'eau du barrage constitue à la fois une source fragile et majeure dans l'irrigation du périmètre. Cela est aussi confirmé par l'irrégularité des taux d'allocation en eau réservées au périmètre et qui connaisse d'importantes oscillations annuelles de l'ordre de 3Hm<sup>3</sup> à 25Hm<sup>3</sup>. Ces quotas ne permettaient pas l'irrigation des surfaces au-delà de 7000ha, soit 35% de la surface totale du périmètre. L'année 2006 est considérée comme étant la plus défavorisée du périmètre avec 15% de surface irriguée.

La situation alarmante que court le périmètre est à l'origine de la création de quatre associations des irrigants où le taux d'adhésion est d'environ 70%, ce qui engendre une forte cohésion des agriculteurs.

Le recours vers les systèmes économiseurs en eau nécessite des réflexions participatives et des aménagements spécifiques tels que des bassins collectifs afin de permettre l'accès à la ressource d'une manière plus fréquente.

Malgré les déficits en eau qu'accuse le réseau collectif et les agriculteurs qui se plaignent à la fois de la qualité de service et des barèmes de facturation des volumes d'eau consommés, celui-ci reste tout de même sollicité. Plus de 70% des exploitations souscrivent un contrat d'irrigation à l'office d'irrigation (en général pour la totalité de leur parcelles irrigables et cela pour plusieurs quotas).

## **Conclusion générale**

L'économie de l'eau, une meilleure utilisation des ressources existantes, des outils techniques de sensibilisation et d'accompagnement, sont autant d'éléments visant la maîtrise de la demande en eau. Cela suppose des efforts considérables de la part des politiques et une implication de la part des usagers qui constituent le dernier maillon de la chaîne de l'eau.

L'étude de la demande en eau en agriculture est complexe et ne peut pas se contenter de la seule estimation théorique des besoins en eau des cultures. Un certain nombre de paramètres, non techniques, tels que, les comportements individuels des agriculteurs dans la conduite de l'irrigation, nécessitent d'être intégrés dans la formulation de la demande en eau.

Le territoire mascarien, dans le bassin versant de la Macta est caractérisé par des espaces irrigués distincts (Grand Périmètre Irrigué, périmètre maraicher périurbain irrigué avec un mélange d'eau conventionnelle et non conventionnelle, nouvelles exploitations arboricoles modernes) mais fortement liés par le concept de la gestion de l'eau.

Cette dernière diffère d'un espace à un autre, le constat fait que les GPI peuvent être les premiers à sacrifier en cas de situation de manque d'eau au détriment des autres usages d'eau.

Le constat ressort également les rapports de force dans le cas du périmètre périurbain où l'irrigation avec l'eau non conventionnelle profite à une certaine catégorie d'agriculteurs au détriment d'une autre catégorie, contrairement à l'irrigation des exploitations individuelles modernes où la principale ressource est l'eau souterraine, où l'irrigation peut atteindre un niveau de maîtrise très appréciable.

La gestion des ressources en eau dans la région de l'ouest algérien est un sujet complexe, dans le sens où elle dépend de nombreuses variables : climatiques, économiques, sociales, démographiques, mais également des aspects relatifs à l'infrastructure utilisée pour produire et distribuer l'eau. Le bilan hydrique représente l'instrument fondamental de la planification relatif à la gestion des eaux, il a pour objectif de comparer l'offre et la demande, l'identification des déficits et des excédents.

Parmi les modèles agissant dans ce sens, l'outil SAMIR que nous avons appliqué sur une parcelle d'agrumes de 20 hectares afin d'obtenir des résultats qui puissent servir de référence ou de point de repère à la gestion de l'eau, à l'irrigation des agrumes et à l'estimation de leur besoins en eau, il est basé sur l'approche double de la méthode FAO-56. Il s'est avéré que cette

méthode, qui sépare entre l'évaporation des sols et la transpiration des cultures, simule les besoins en eau des agrumes assez précisément, nos résultats montrant une simulation des débits proche de 97,3% des doses fournies par l'agriculteur que nous jugeons fiables.

La précision des simulations des irrigations est quantifiée par le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) qui est de  $0.11\text{m}^3/\text{j}$ , et quantifiée aussi par le calcul de l'indice d'agrément «  $d$  » qui est égale à 80.94, et par le calcul du ratio : volume d'irrigation observé/volume d'irrigation simulé, ce ratio varie entre 0.76 et 1.27.

Cette conformité des résultats entre les données de simulation et les données de terrain montre que la télédétection est une source d'information d'une grande utilité pour le suivi des besoins en eau des cultures, notamment pour les agrumes, en ayant recours à la méthode FAO-56 double.

Au niveau du périmètre de Habra, où le système d'irrigation est constitué d'un réseau gravitaire régit par une réglementation rigide, les agriculteurs s'organisent en forme d'association d'irrigants pour faire le poids vis-à-vis de l'administration chargée de la gestion de l'eau des GPI, et permettre ainsi la survie de leur vergers d'agrumes.

La gestion de l'eau au sein des GPI semble être un défi perpétuel, ce qui ne permet pas une projection de développement agricole dans l'avenir. L'intégration des usagers dans le processus de la construction de la demande en eau comme elle se fait au sein du périmètre Habra semble peu efficace et demeure toujours insuffisante, mais indispensable pour la survie du système agraire du périmètre.

Une autre dimension de la gestion intégrée des ressources en eau a fait l'objet d'un intérêt de notre étude, le périmètre périurbain de Mascara se caractérisant par une dynamique hydro-agricole autour d'une utilisation conjointe d'eau conventionnelle et non conventionnelle.

L'historique de ce système d'irrigation géré par la communauté du périmètre de Mascara a été animé, notamment suite aux interventions de l'État, d'abord avec la construction de la station d'épuration (STEP) en 1970 et ensuite en libérant l'eau épurée de la même station dans les canalisations d'irrigation en 2004. La vision d'un système basé sur une multi-source d'eau d'irrigation a progressivement eu des impacts sur la dynamique hydro-agricole.

La communauté des irrigants du périmètre de Mascara a démontré sa capacité d'adaptation dans l'intégration de nouvelles ressources en eau dans son système d'irrigation, d'un point de vue

pratique d'abord, vu que les agriculteurs ont su intégrer l'eau non conventionnelle dans un système d'eau conventionnelle, et d'un point de vue gestionnel vu que les agriculteurs agissent selon des lois de partage de l'eau à l'intérieur du périmètre, et s'organisent sous forme de Groupement d'Intérêt Commun (GIC) afin de pouvoir négocier avec les pouvoirs publics, chargés de la gestion de l'eau épurée par la STEP.

Les trois modes de gestion abordés dans cette étude, illustrent parfaitement la complexité de la gestion de l'eau. A ce propos, il est important de noter que l'avenir d'une zone agricole réside dans sa capacité à gérer ses ressources en eau. Cette étude a le mérite d'avoir couvert aussi bien les zones GPI que celle de la PMH périurbaine et l'exploitation privée à ressource en eau souterraine individuelle.

Il s'agit d'une contribution à la problématique de l'utilisation des ressources en eau à l'échelle du bassin versant sous ses différents usagers et ses modes de gestion. Bien que développée dans le bassin versant de la Macta (Algérie), les résultats obtenus revêtent un caractère universel apte à la généralisation à d'autres bassins versants. Ils pourraient donc être implémentés moyennant une adaptation au contexte environnemental, socio-économique et culturel propre à la région, à des bassins versants agricoles, périurbains dans d'autres régions similaires.



## Références bibliographiques

- Abrishamchi A., Alizadeh A., Tajrishy M. 2007.** Water resources management scenario analysis in the Karkheh river basin, Iran using the WEAP model. *Hydrological Science and Technology*, 23, 1-12
- Agah A.E, Meire P., Deckere D. 2017.** Influence of synthetic wastewater on the transport and transformation in irrigated soils, *Desalination and Water Treatment*, 72, 136–145. doi:10.5004/dwt.2017.2063
- Akli S. 2015.** Économie des ressources en eau en algérie : quelle place pour la gestion de la demande et quel impact sur l'économie de l'eau ? Application au bassin côtier algérois 02a. These doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie –Alger, 200 p.
- Alam K. 2015.** Farmers' adaptation to water scarcity in drought-prone environments: a case study of Rajshahi district, Bangladesh. *Agric. Water Manage.*, 148,196–206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.011>
- Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. 2011a.** Evapotranspiration information reporting: I factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Manage.*, 98, 899–920
- Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. 2011b.** Evapotranspiration information reporting: II recommended documentation. *Agricultural Water Manage.*, 98, 921–929
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998.** Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements, Irrigation and Drain, Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 p.
- Allen R.G., Tasumi M. 2003.** Application of SEBAL for western US water rights regulation and planning. International Workshop Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions
- Amichi F., Bouarfa S., Lejars C., Kuper M., Hartani T., Daoudi A., Amichi H., Belhamra M. 2015.** Des serres et des hommes : des exploitations motrices de l'expansion territoriale et de l'ascension socioprofessionnelle sur un front pionnier de l'agriculture saharienne en Algérie. *Cahiers Agricultures*, 24, 11-19. DOI : 10.1684/agr.2015.0736
- Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D., Pinter P.J. 1985.** Estimating of total above ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17, 211-220
- Aubriot O. 2006a.** La participation en irrigation: quels changements depuis la loi de l'an 2000 au Tamil Nadu? (Participation in irrigation: which changes in Tamil Nadu, since the Act of 2000?). *Bull. Assoc. Geogr. Fr.*, 83, 161–173

- Aubriot O. 2006b.** Eau souterraine et eaux de surface en Inde du sud: des politiques hydrauliques disparates, in: PCSI-4e Séminaire International et Interdisciplinaire. Cirad, 10 p.
- Balasubramanian R., Selvaraj K.N. 2003.** Poverty, private property, and common poolresource management: the case of irrigation tanks in South India. South Asian Network for Development and Environmental Economics
- Bastiaanssen W.G.M. 2000.** SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal Hydrologie*, 229, 87-100
- Bausch W.C. 1995.** Remote sensing of crop coefficients for improving the Irrigation scheduling of corn. *Agricultural Water Manage.*, 27, 1, 55–68
- Bekkoussa B., Meddi M., Jourde H. 2008.** Forçage climatique et anthropique sur la ressource en eau souterraine d’une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). *Sècheresse*, 19, 3, 173-184
- Benblidia M. 2011.** “ L’efficience d’utilisation de l’eau et approche économique. Etude nationale Algérie“. In Plan Bleu, Centre d’Activités Régionales PNUE/PAM [http://planbleu.org/sites/default/files/publications/efficience\\_eau\\_algerie.pdf](http://planbleu.org/sites/default/files/publications/efficience_eau_algerie.pdf)
- Benblidia M., Thivet G. 2010.** “Gestion des ressources en eau : les limites d’une politique de l’offre“. In, Les Notes d’analyse du CIHEAM. N°58–Mai 2010. CIHEAM et Plan Bleu
- Benhadj I., Duchemin B., Simonneaux V., Maisongrande P., Khabba S., Chehbouni A.G. 2012.** Automatic unmixing of MODIS multi-temporal data for inter-annual monitoring of land use at regional scale (Tensift, Morocco). *International Journal of Remote Sensing*, 33, 5, 1325-1348
- Benmihoub A., Bedrani S. 2012.** L’attitude Des Irrigants vis à vis de l’augmentation du tarif de l’eau : Cas d’un périmètre d’irrigation public en Algérie. *Cahier du CREAD n°98-99/2011-2012 pp. 75-101*
- Benslimane M., Hamimed A., Khaldi A., Zeray W. 2015.** Approche méthodologique d’évaluation de la politique de gestion de l’eau des zones humides cas du chott chergui (sud-ouest algérien). *Larhyss Journal*, 22, 167-181
- Berliner P., Oosterhuis D.M., and Green G.C. 1984.** Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. *Agric. Forest. Meteorol.*, 31, 219-230
- Berthier C.H. 2005.** Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle empirique. Master II, Sciences de la terre spécialité hydrologie, hydrogéologie des sols, Université Paris-Sud 11, France, 50 p.

- Bessedik M. 2007.** Vers une gestion durable de l'eau dans les villes algériennes. Communication au 3ème Atelier régional sur l'eau et le développement durable en Méditerranée, Saragosse
- Bezerra B.G., Silva B.B., Bezerra J.R. C., Brandão Z.N. 2010.** Real actual evapotranspiration obtained through the relationship between the FAO-56 crop dual coefficient and NDVI. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 3. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000300012>.
- Blaney H.F., Criddle W.D. 1950.** Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. USDA (SCS) TP, 96 48
- Blinda M., Thivet G. 2006.** Faire face aux crises et pénuries d'eau en Méditerranée; Les Notes du Plan Bleu 4: environnement et développement durable en Méditerranée, Sophia Antipolis, France, 4 p.
- Boudjadja A., Messahel M., Pauc H. 2003.** Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Revue des sciences de l'eau*, 16, 3, 285-304
- Boulet G., Chehbouni A., Braud I., Vauclin M., Haverkamp R., Zammit C. 2000.** A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization. *Agric. Forest. Meteorol.*, 105, 117–132
- Boyer M., Patry M., Pierre T. 2001.** La gestion déléguée de l'eau. Montréal : CIRANO, 25 p.
- Braud I., Dantas-Antonino A.C., Vauclin M., Thony J.L., Ruelle P. 1995.** A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *J. Hydrol.*, 166, 213–250
- Bréthaut C. 2012.** « Christian Bréthaut, Analyse comparée de régimes institutionnels de gestion des réseaux urbains de l'eau en station touristique de montagne. Les cas de Crans-Montana (Suisse) et de Morzine-Avoriaz (France) », *Mondes du Tourisme*, pp. 106-108. [En ligne]. URL : <http://tourisme.revues.org/253>.
- Breuil L. 2004.** Renouveler le partenariat public-privé pour les services d'eau dans les pays en développement : Comment conjuguer les dimensions contractuelles, institutionnelles et participatives de la gouvernance ? Thèse doctorat. Ecole Nationale Du Genie Rural, Des Eaux Et Des Forêts (ENGREF), Paris. 321 p.
- Briand A., Lemaitre A. 2004.** Privatisation de la distribution de l'eau potable en Afrique : une aubaine ?. In : Actes de la journée d'étude « Les territoires de l'eau », Université d'Artois, Arras, 18 p.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Baret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot**

- X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. 1998.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomy journal*, 18, 311-346
- Burgess S.S.O., Adams M.A., Turner N.C., Beverly C.R., Ong C.K., Khan A.A.H., Bleby T.M. 2001.** An improved heat pulse method to measure slow and reverse flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21, 589-598
- Calera-Belmonte A., Jochum A., Cuesta-Garcia A., Montoro-Rodriguez A., Lopez-Fuster P. 2005.** Irrigation management from space : towards user friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 337-353
- Cap-Net. 2005.** Plans de gestion intégrée des ressources en eau. Manuel de formation et guide opérationnel. Module de Formation, Plans GIRE (version traduite). United Nations Développement Programme (UNDP), Global Water Partnership (GWP)
- Carlson T.N., Buffum M.J. 1989.** On estimating total daily evapotranspiration from remote surface temperature measurements. *Remote Sensing of Environment*, 29, 197-207
- Castaño S., Sanz D., Gómez-Alday J.J. 2010.** Methodology for quantifying groundwater abstractions for agriculture via remote sensing and GIS. *Water Resources Management*, 24, 795-814. DOI: 10.1007/s11269-009-9473-7
- Chanzy A. 1991.** Modélisation simplifiée de l'évaporation d'un sol nu utilisant l'humidité et la température de surfaces accessibles par télédétection. Thèse doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, p. 221
- Chibane B., Bentchakal M., Medjerab A., Benfares B. 2015.** Etude de la variabilité et de la structure de pluie annuelle dans une région semi-aride : cas du bassin versant de la Mactaa (nord-ouest algérien). *Larhyss Journal*, 23, 213-229
- Chirouze J., Boulet G., Jarlan L., Fieuzal R., Rodriguez J.C., Ezzahar J., Er-Raki S., Bigeard G., Merlin O., Garatuza-Payan J. 2014.** Intercomparison of four remote-sensing-based energy balance methods to retrieve surface evapotranspiration and water stress of irrigated fields in semi-arid climate. *Hydrology and earth system sciences*, 18, 1165–1188
- Choudhury B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J., Daughtry C.S.T. 1994.** Relations Between evaporation coefficients and vegetation indices studies by model simulations. *Remote Sens. Environ.*, 50, 1-17
- Chuanyana Z., Zhongrena N., Zhaodonga F. 2004.** GIS-assisted spatially distributed modeling of the potential evapotranspiration in semi-arid climate of the Chinese Loess Plateau. *Journal of arid environment*, 58, 387-403

- Cifdaloz O., Regmi A., Anderies J.M., Rodriguez A.A. 2010.** Robustness, vulnerability, and adaptive capacity in small-scale social-ecological systems: The Pampa Irrigation System in Nepal. *Ecol. Soc.* 15, 39 p.
- Ciriacy-Wantrup S.V. 1969.** Natural resources in economic growth: the role of institutions and policies. *Am. J. Agric. Econ.* 51, 1314–1324
- Clarke D., Smith M., El-Askari K. 1998.** New software for crop water requirements and irrigation scheduling. *International Commission Irrigation and Drainage*, 47, 45-58
- Cleaver F., De Koning J. 2015.** Furthering critical institutionalism. *Int. J. Commons.* 9
- CNES. 2005.** Rapport sur le développement humain.
- Coward E.W. 1980b.** Irrigation and agricultural development in Asia: Perspectives from the social sciences. Cornell University Press
- Cox M., Ross J.M. 2011.** Robustness and vulnerability of community irrigation systems: The case of the Taos valley acequias. *J. Environ. Econ. Manage.* 61, 254–266
- Damagnez J. 1968.** Les bilans hydriques et énergétiques et l'étude des facteurs du milieu. Agroclimatological method. Proc. Of the Redding Sym. UNESCO, Paris
- Danelichen V.H.M., Biudes M.S., Souza M.C., Machado N.G., Da-Silva B.B., Nogueira J.S. 2014.** Estimation of soil heat flux in a neotropical Wetland region using remote sensing techniques. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29, 4. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620120568>
- De Nys E. 2004.** Interaction between water supply and demand in tow collective irrigation schemes in north-east Brazil. Thèse de doctorat, Leuven, 193 p.
- Delogu E., Boulet G., Oliosio A., Coudert B., Chirouze J., Ceschia E., Le-Dantec V., Marloie O., Chehbouni G., Lagouarde J.P. 2012.** Reconstruction of temporal variations of evapotranspiration using instantaneous estimates at the time of satellite overpass. *Hydrology and earth system sciences*, 16, 2995–3010
- Dembele A. 2007.** Historique, origine et mise en œuvre du concept de "gestion intégrée des ressources en eau". Synthèse bibliographique. ENGREF Centre de Montpellier, 13 p.
- Dongyuan S.U.N., YIlihamu F., Chengyi Z. 2010.** Progress in the study on conjunctive regulation of surface water and groundwater in arid inland river basins. *Prog. Geogr.* 28, 167–173. <http://dx.doi.org/10.11820/dlkxjz.2009.02.002>
- DREW. 2015.** (direction des ressources en eau de la wilaya) : Etat de situation des études des ouvrages hydrauliques de mobilisation des eaux superficielles. Rapport périodique
- Droogers P., Allen R.G. 2002.** Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrig. Drain. Syst.*, 16, 33–45

- Droogers P., Immerzeel W.W., Lorite I.J. 2010.** Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agricultural Water Management*, 97, 1351–1359
- Dubost D., Moguedet G. 1998.** Un patrimoine menacé: les foggaras du Touat. *Sci Chang planétaires/Sécheresse*, 9, 117–122
- Duchemin B., Hadria R., Er-Raki S., Boulet G., Maisongrande P., Chehbouni A., Escadafal R., Ezzahar J., Hoedjes J.C.B., Kharrou M.H., Khabba S., Mougenot B., Oliso A., Rodriguez J.C., Simonneaux V. 2006.** Monitoring wheat phenology and irrigation in Center of Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79, 1-27
- Ducrocq M. 1987.** Les bases de l'irrigation. Editions scientifiques universitaires, Mkalles- Mar Roukoz, BP 1514-Beyrouth (Liban)
- Edwards W.R.N., Becker P., Cermak J. 1996.** A unified nomenclature for sap measurements. *Tree Physiol.*, 17, 65-67
- El Hari A. 1992.** Besoins en eau des agrumes dans le Haouz- Effet du stress hydrique sur le rendement et le calibre du clémentinier. Diplôme d'Etudes Supérieures (DEA), Université Cadi Ayyad de Marrakech. Faculté des Sciences
- Elbana M., Puig-Bargués J., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. 2010.** Preliminary planning for reclaimed water reuse for agricultural irrigation in the province of Girona, Catalonia (Spain), *Desalination and Water Treatment*, 22, 47–55. doi: 10/5004/dwt.2010.1523
- Elmeddahi Y., Mahmoudi H., Issaadi A., Mattheus F.A.G. 2016.** Analysis of treated wastewater and feasibility for reuse in irrigation: a case study from Chlef, Algeria, *Desalination and Water Treatment*, 57, 5222–5231. doi: 10.1080/19443994.2015.1021999
- Ensink J.H., Simmons R.W., Van der Hoek W. 2004.** Wastewater use in Pakistan : the case studies of Haroonabad and Faisalabad. *Wastewater Use in Irrigated Agriculture : Confronting the Livelihood and Environmental Realities*, 91–99
- Ensink J.H., Van der Hoek W., Matsuono Y., Munir S., Aslam R. 2002.** Use of Untreated Wastewater in Peri-urban Agriculture in Pakistan : Risks and Opportunities. Research Report 64. International Water Management Institute : P O Box 2075, Colombo, Sri Lanka, 22 p. DOI : 10.3910/2009.069
- Er-Raki S., 2007.** Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection. Thèse doctorat, Université Cadi Ayyad Faculté Des Sciences Semlalia – Marrakech. 128 p.

- Er-Raki S., Chehbouni G., GuemouriaN., Duchemin B., Ezzahar J., Hadria R. 2007.** Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Manageme.*, 87, 41-54
- Evans A. 2010.** Groundwater/Surface water dilemma in arizona: a look back and a look ahead toward conjunctive management reform. *Phoenix L. Rev.* 3, 269 p.
- FAO. 1997.** Réformer les Politiques dans le Domaine des Ressources en Eau: Guide des Méthodes, Processus et Pratiques. (Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage - 52) Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome
- Fayesse N., Hartani T., Frija A., Marlet S., Tazekrit I., Zaïri C., Challouf A. 2011.** Usage agricole des eaux souterraines et initiatives de gestion au Maghreb : Défis et opportunités pour un usage durable des aquifères. *AFBD-BAFD*, 24 p.
- Fernald A., Guldan S., Boykin K., Cibils A., Gonzales M., Hurd B., Lopez S., Ochoa C., Ortiz M., Rivera J. 2015.** Linked hydrologic and social systems that support resilience of traditional irrigation communities. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 19, 293–307
- Fernández J.E., Palomo A. Díaz-Espejo B.E. Clothier S.R. Green I.F. Girón F. Moreno. 2001.** Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Manage.*, 51, 99-123
- Fisher A., Fullerton D., Hatch N., Reinelt P. 1995.** Alternatives for managing drought: a comparative cost analysis. *J. Environ. Econ. Manage.*, 29, 304–320. <http://dx.doi.org/10.1006/jeem.1995.1049>
- Fornés J.M., la Hera Á., Llamas M.R. 2005.** The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain. *Water Policy* 7, 253–268
- Garadi A. 1992.** Prospective des besoins en eau et anticipation de la demande. MADH2O Modèle Automatisé de la Demande en Eau Application à l'Algérie. Thèse de Doctorat en Sciences Economiques - Option : gestion et planification de l'eau -. Centre de Recherche en Informatique appliquée aux Sciences Sociales, Université Pierre Mendès, Grenoble, France
- Garatuza J.P. Watts C.J. 2005.** The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 301-320
- Geertz C. 1963.** *Agricultural involution: the process of ecological change in Indonesia.* University of California Press
- Glick T.F. 1970.** *Irrigation and society in medieval Valencia*
- Gliz M., Anteur D., Makhlof M. 2014.** Impact de l'irrigation avec des eaux Chargées en matières en suspension sur la perméabilité du sol cas de la plaine de l'habra (Algérie). *European Scientific Journal.* 10, 27, ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431

- Gliz M., Remini B., Anteur D., Makhoul M. 2015.** Vulnerability of soils in the watershed of Wadi El Hammam to water erosion (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, 24, 3–10. DOI : 10.1515/jwld-2015-0001
- Gonzalez-Dugo M.P., Neale C. M., Mateos L., Kustas W.P., Prueger J.H., Anderson M.C., Li F. 2009.** A comparison of operational remote sensing-based models For estimating crop evapotranspiration. *Agricultural Water Manage.*, 149, 1843–1853
- González-piqueras, J. 2006.** Evapotranspiration de la Cubierta Vegetal mediante la Determinación del Coeficiente de Cultivo por Teledetección. Extensión a Escala Regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental. Tese Doctoral apresentada na Universitat de Valencia
- Granier A. 1985.** A new method of sap flow measurements in tree stems. *Annales des Sciences Forestiers*, 42, 193-200
- Green A.E., S.R., Astill M.S., Caspari H.W. 2000.** ‘Estimating latent heat flux from a vineyard using scintillometry’, *J. Terres. Atmos. Ocean. Sci.*, 11, 2, 525-542
- Hamamouche M.F. 2017.** Renouveau d’un système irrigué communautaire suite au déverrouillage de l’accès aux eaux souterraines profondes. Cas du territoire oasien de Sidi Okba dans le Sahara algérien. *Etudes de l’environnement. AgroParisTech; Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II*, 200 p.
- Hamamouche M.F., Kuper M., Riaux J., Leduc C. 2017.** Conjunctive use of surface and ground water resources in a community-managed irrigation system : The case of the Sidi Okba palm grove in the Algerian Sahara. *Agric. Water Manage.*, 193, 116–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.005>
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. 1985.** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1, 2, 96–99
- Hartani T., Hammani A., Kuper M., Debbarh A. 2004.** La réutilisation des eaux usées en irrigation : cas de la Mitidja en Algérie. Séminaire sur la modernisation de l’agriculture irriguée, Rabat, Morocco. IAV Hassan II, 11 p. <cirad-00188187>
- Heilman J.L., Heilman W.E., Moore D.G. 1982.** Evaluating the Crop Coefficient Using Spectrales Reflectance, *Agronomy Journal*, 74, 967-971
- Huete A.R. 1988.** A Soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25, 295-309
- Huete A., Jackson R., Post D. 1985.** Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing*, 17, 37–53
- Hunsaker D.J., Pinter P.J.J., Kimball B.A. 2005.** Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrig. Sci.*, 24, 1-14



- Idso S.B., Jackson R.D., Pinter P.J. 1977.** Remote sensing of crop yields. *Science*, 196, 19-25
- Iglesias A., Garrote L. 2015.** Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe, *Agric. Water Manage.*, 155, 113–124 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>.
- Imache A., Chabaca M., Djebbara M., Merabet B., Hartani T., Bouarfa S., Palagos B., Kuper M., Le Goulven P., Le Grusse P. 2006.** Demandes en eau des exploitations agricoles du périmètre irrigué de la Mitidja ouest (Algérie). *Economies d'eau en Systèmes Irrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Morocco.* <cirad-00194573>
- Imache A., Le Goulven P., Bouarfa S., Chabaca M., Kuper M., Zairi A.A., 2007.** Evolutions de la demande en eau agricole dans la plaine irriguée de la Mitidja, Algérie. Troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisia. Cirad, 10 p. <cirad-00259795>.
- ITAFV. 2011.** La culture des agrumes, Institut Technique de l'Arboriculture Fruitière et de la Vigne. Alger. 24 p.
- Jackson R.D., 1985.** Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proc. IEEE*, 73, 1086-1095
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J.J. 1981.** Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 17, 1133-1138
- Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J.J. 1980.** Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. In: *Irrigation and Drainage, special conference proceedings, 23-25 July, Boise, Idaho.* ASCE, New York, 390-397
- Jackson R.D. 1983.** Spectral indices in N-space, *Remote Sensing of Environment*, 14, 409-421
- Janssen M.A., Anderies J.M., Ostrom E. 2007.** Robustness of social-ecological systems to spatial and temporal variability. *Soc. Nat. Ressources*, 20, 307–322
- Jarousseau H., Wassenaar T., Sallote B., Paillat J.M. 2016.** Recyclage des déchets et dynamiques sociales dans la transition du rural au périurbain à la Réunion. *Cahiers Agricultures*, 25, 65002. DOI : 10.1051/cagri/2016043
- Jimmy P.K., Moumouni Moussa I. 2016.** Capital social et gestion des conflits dans le périmètre irrigué de Malanville au Bénin. *Cahiers Agricultures*, 25, 65003. DOI : 10.1051/cagri/2016042
- Kalavrouziotis I.K., Kokkinos P., Oron G., Fatone F., Bolzonella D., Vatyliotou M., Fattakassinos D., Koukoulakis P.H., Varnavas S.P. 2015.** Current status in wastewater treatment,

reuse and research in some mediterranean countries, *Desalination and Water Treatment*, 53, 2015–2030. doi: 10.1080/19443994.2013.860632

**Karef S., Kettab A., Nakib M. 2014.** Characterization of byproducts from wastewater treatment of Medea (Algeria) with a view to agricultural reuse ; *Desalination and Water Treatment*, 52, 2201–2207. doi: 10.1080/19443994.2013.848332

**Kashyap P.S., Panda R.K. 2001.** Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of cropcoefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agric. Water Manage.*, 50, 1, 9–25

**Kassah A. 1998.** Eau et développement agricole au Sahara maghrébin: enjeux, conflits etarbitrages. *Sci Chang planétaires/Sécheresse*, 9, 95–102

**Katerji N., Hallaire M. 1984.** Explicative model of water transfert in the plant and daily evolution of leaf potential. *Les besoins en eau des cultures*, Conférence internationale, Paris, 11/14 Septembre

**Kessira M. 2013.** Synthèse Internationale du Projet “Sécurité d’utilisation des eaux usées en agriculture” Téhéran, Iran : Politiques de soutien et cadres institutionnels - Valorisation des eaux usées épurées en irrigation. Ministère de l’agriculture et du développement rural, Algérie. 14 p.

**Khalidi A., Hamimed A., Mederbel K., Seddini A. 2011.** Obtaining Evapotranspiration And Surface Energy Fluxes With Remotely Sensed Data To Improve Agricultural Water Manage., *AJFAND*, 11, 1, 24 p.

**Koffi Y.B. 2007.** Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire. These Doctorat, University of Cocody Abijan, 231 p.

**Kouzmine Y. 2012.** Le Sahara algérien, Intégration nationale et développement régional. L’Harmattan, Paris, France

**Kuper M. 2011.** Des destins croisés: regards sur 30 ans de recherches en grande hydraulique. *Cahiers Agricultures*, 20, 16–23

**Kuper M., Faysse N., Hammani A., Hartani T., Marlet S., Hamamouche M.F., Ameer F. 2016.** Liberation or anarchy? The Janus nature of groundwater use on North Africa’s new irrigation frontiers, in: Jakeman T., Barreteau O., Hunt R., Rinaudo J., Ross A. (Eds.), *Integrated Groundwater Management*. Springer, pp. 583–615.

**Labbé F., Ruelle P., Garin P., Leroy P. 2000.** Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy*, 12, 55-67. DOI : 10.1016/S1161-0301(99)00043-X

- Laborde J.P. 1993.** Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle du 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- Lagouarde J.P., Choisnel E. 1989.** A new agrometeorological model for evaporation and surface temperature
- Lam W.F. 1998.** Governing Irrigation Systems in Nepal: Institutions, Infrastructure, and Collective Action. Institute for Contemporary Studies, Oakland, CA.
- Leach E.R. 1959.** Hydraulic society in Ceylon. Past Present 2–26
- Leduc C., Pulido-Bosch A., Remini B. 2017.** Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. *Hydrogeol. J.* 25, 1529–1547. doi:10.1007/s10040-017-1572-6
- Lightfoot D.R. 1996.** Moroccan khattara: traditional irrigation and progressive desiccation. *Geoforum* 27, 261–273. doi:10.1016/0016-7185(96)00008-5
- Llamas M.R., Custodio E. 2003.** Intensive use of groundwater: a new situation which demands proactive action, in: Llamas M. R., Custodio E. (Eds.), *Intensive Use of Groundwater : Challenges and Opportunities*. AA Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 13–31.
- Llamas M., Martínez-Santos P. 2005.** Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 131, 337–341. doi:10.1061/(ASCE) 0733-9496(2005)131:5(337)
- Loucif N. 2002.** Les ressources en eau et leur utilisation dans le secteur agricole en Algérie. *Revue Homme, Terre et Eaux*, 125
- Loussert R. 1987.** Les agrumes. *Techniques Agricoles Mediteraneennes*
- Luquet D. 2002.** Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge- analyse expérimentale et modélisation 3D de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang decotonniers. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 167 p.
- Mabry J.B. 1996.** Canals and communities: Small-scale irrigation systems. University of Arizona Press
- Mahaman T.A. 2005.** Le partenariat public-privé dans le secteur de l'eau au Niger : autopsy d'une réforme, *Annuaire suisse de politique de développement* 24, 2, mis en ligne le 19 février 2010, URL : <http://aspd.revues.org/360>
- Marek T.H., Schneider A.D., Howell T.A., Ebeling L.L. 1988.** Design and construction of large weighing monolithic lysimeters. *Trans. ASAE*, 31, 477-484
- Margat J., 2008.** Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde, Coédition:UNESCO et BRGM

- Margat J., Van der Gun J. 2013.** Groundwater around the world: a geographic synopsis. CRC Press
- Maton L. 2008.** Evaluation économique du programme de mesures de gestion quantitative des ressources en eau dans l'Ouest de l'Hérault. Volume 1 : scénario tendanciel et analyse coût – efficacité pour l'usage agricole de l'eau. Rapport BRGM- RP 56143
- McIntosh A.M. 2003.** Asian Water Supplies Reaching the Urban Poor a Guide and Sourcebook for Urban Water Supplies in Asia for Governments, Utilities, Consultants, Development Agencies and Nongovernment Organizations, Copublished by the Asian Development Bank and IWA Publishing
- Meddi M., Hubert P. 2003.** Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. In : Hydrology of the mediterranean and semiarid regions, IAHS publication, n°278, p. 229-235.
- Meddi M., Humbert J. 2000.** Étude des potentialités de l'écoulement fluvial dans le Nord de l'Algérie en vue d'une réalimentation des aquifères. In : Eaux sauvages, eaux domestiquées, Hommage à L. DAVY, Publications de l'Université de Provence, p. 177190.
- Meddi M., Talia A., Martin C. 2009.** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 3), 61-84
- Meinzen-Dick R. 1997.** Farmer participation in irrigation–20 years of experience and lessons for the future. Irrig. Drain. Syst. 11, 103–118
- METAP. 2001.** Rapport sur la gestion de la qualité de l'eau et des interventions possibles du METAP, Alger, 12 p.
- Meublat G. 2001.** “La rénovation des politiques de l'eau dans les pays du sud“. In revues Tiers Monde, 166
- Michael M.G., Bastiaanssen W.G. 2000.** A new simple method to determine crop coefficients for water allocation planning from satellites: results from Kenya? Irrigation and Drainage Systems, 14, 3, 237–256
- Minacapilli M., Iovino M., D'urso G. 2008.** A distributed agro-hydrological model for irrigation water demand assessment. Agricultural Water Manage., 95, 123-132
- Miossec M.P. 2004.** Apport des multi-modèles pour la modélisation sur des bassins versants non jaugés. DEA Hydrologie, hydrogéologie, géostatistique et géochimie. Université Pierre et Marie Curie, Université de Paris-sud, Ecole Nationale du Génie Rural des eaux et des Forêts, CEMAGREF, Antony, France, 43 p.

- Moore I.D. 1996.** Hydrologic modeling and GIS. In: Goodchild, et al. (Eds.), GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues. Donald F., Hemenway J., Fort Collins, 143–149.
- Moran M.S. 1994.** Irrigation management in Arizona using satellites and airplanes. *Irrigation Science*, 15, 35-44
- Moran M.S., Inoue Y., Barnes E.M. 1997.** Opportunities and limitations for image based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing Environment*, 61, 319346
- Morgan M., Ghosn A. 2013.** État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. IPIMED, 27 p.
- Mozas M., Ghosn A. 2013.** “État des lieux du secteur de l'eau en Algérie“. In Etudes et analyses. Institut de Prospective Economique du monde MEDiterranéen (IPEMED)
- MRE (Ministère des Ressources en Eau algérien). 2003.** Etat des lieux et perspectives de développement dans le secteur des ressources en eau. Conseil du gouvernement du 03 Juillet 2003
- Nakib M., Kettab A., Berreksi A., Tebbal S., Bouanani H. 2016.** Study of the fertilizing potential of the treated wastewater of the Kolea wastewater treatment plant (Algeria), *Desalination and Water Treatment*, 57, 5946–5950. doi: 10.1080/19443994.2015.1054310
- Naresh R.K., Minhas P.S., Goyal A.K., Chauhan C.P.S., Gupta R.K. 1993.** Conjunctive use of saline and non-saline waters: II. Field comparisons of cyclic Uses and mixing for wheat, *Agric. Water Manage.*, 23, 139–148
- Neale C.M.U., Bausch W.C., Heerman D.F. 1989.** Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. ASAE*, 32, 6, 1891-1899
- Niang S. 1996.** Utilisation des eaux usées domestiques en maraîchage périurbain à Dakar (Sénégal), *Sècheresse*, 3, 7, 217-223
- Olioso A., Chauki H., Courault D., Wigneron J.P. 1999.** Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models, *Remote Sensing of Environment*, 68, 341–356
- ONA (Office National de l'Assainissement). 2011.** Perspectives de la réutilisation des eaux usées épurées en Algérie. 7ème salon international des équipements, des technologies et des services de l'eau- Algérie Pollutec le 27 avril 2011
- Ostrom E. 1992.** Crafting institutions for self-governing irrigation systems
- Palomo M.J., Moreno F., Fernandez J.E., Diaz-Espejo A., Giron I.F. 2002.** Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agricultural Water Manage.*, 55, 15-35

- Pavelic P., Patankar U., Acharya S., Jella K., Gumma M.K. 2012.** Role of groundwater in buffering irrigation production against climate variability at the basin scale in South-West India. *Agric. Water Manage.*, 103, 78–87, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.019>
- Pérez I., Janssen M., Tenza A., Giménez A., Pedreño A., Giménez M. 2011.** Resource intruders and robustness of social-ecological systems: an irrigation system of Southeast Spain, a case study. *Int. J. Commons.*, 5, 410–432. doi:doi.org/10.18352/ijc.278
- Petit O., Kuper M., López-Gunn E., Rinaudo J.D., Daoudi A., Lejars C. 2017.** Can agricultural groundwater economies collapse? An inquiry into the pathways of four groundwater economies under threat. *Hydrogeol. J.*, 25, 1549–1564. doi:10.1007/s10040017-1567-3
- Petit S. 2007.** Paris-Buenos Aires et retour, mythes et limites du « modèle français » de gestion des services d'eau potable, *Environnement Urbain / Urban Environment* [En ligne], 1, 2007, mis en ligne le 01 septembre 2007, 18 p. URL : <http://eue.revues.org/1029>
- Poussin J., Imache A., Beji R., Le-Grusse P., Ben-Mihoub A. 2008.** Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms production units: An example from Tunisia. *Agricultural Water Manage.*, 95, 973–983
- Praloran J.C. 1971.** Les agrumes. *Techniques Agricoles et production tropicale*
- Priestley C.H.B., Taylor R.J. 1972.** On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large Scale Parameters, *Monthly Weather Review*, 100, 81-92
- Purevdorj T.S., Tateishi R., Ishiyama T., Honda Y. 1998.** Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices, *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3519-3535
- Raschid-Sally L., Bradford A.M., Endamana D. 2004.** Productive use of wastewater by poor urban and peri-urban farmers: Asian and African case studies in the context of the Hyderabad Declaration on Wastewater Use. *Beyond Domestic : case studies on poverty and productive uses of water at the household level.* Delft, the Netherlands, IRC International Water and Sanitation Centre. Technical Paper Series 41, 95-116
- Raschid-Sally L., Carr R., Buechler S. 2005.** Managing Wastewater Agriculture To Improve Livelihoods And Environmental Quality In Poor Countries, *Irrigation and Drainage*, 54, (S1). DOI : 10.1002/Ird.182
- Ratner B.D., Meinzen-Dick R., May C., Haglund E. 2013.** Resource conflict, collective action, and resilience: an analytical framework. *International Journal of the Commons*, 7, 1, 183–208

- Ray S.S., Dadhwal V.K. 2001.** Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. *Agricultural Water Manage.*, 49, 239-249
- Reginato R.J., Jackson, R.D., Pinter, J.P. 1985.** Evapotranspiration calculated from remote multispectral and ground station meteorological data, *Remote Sensing of Environment*, 18, 75–89
- Ritchie J.T. 1986.** The CERES-Maize model In: *CERES-Maize: Simulation model of maize growth and development*. Ed by Jones C.A., and Kiniry J.R., Texas A M University press, college station, Tx: 3-6
- Rivas R., Caselles V. 2004.** A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 68–76
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. 1974.** Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt MD, 1-371
- Running S.W., Baldoocchi D.D., Turner D.P., Gower S.T., Bakwin P.S. 1999.** A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling ecosystem modelling and EOS data. *Remote Sens. Environ.*, 70, 108-127
- Saadi S., Simonneaux V., Boulet G., Raimbault B., Mougenot B., Fanise P., Ayari H., Chabaane Z.L. 2015.** Monitoring Irrigation Consumption Using High Resolution NDVI Image Time Series: Calibration and Validation in the Kairouan Plain (Tunisia). *Remote Sensing*, 7, 13005-13028
- Saidi A. 2005.** La politique nationale de l'eau en Algérie, vision, option, perspectives. 1er salon international des ressources en eau, des boissons et dérivés MRE, Alger du 07 Mai au 10 Mai 2005
- Saka B. 2013.** Développement durable, vers un modèle de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf, Nord-Est algérien. Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba. 164p.
- Sakuratani A. 1981.** A heat balance method for measuring sap flow in the stem of an intact plant. *Agricultural Meteorology*, 37, 9-17
- Schlager E. 2007.** Community Management of Groundwater, in: Giordano, M., Villholth, K.G. (Eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Iwmi, colombo Sri Lanka, i CABI Publication, Wallingford UK and Cambridge MA, USA, 131–152

- Schlager E., Blomquist W., Tang S.Y. 1994.** Mobile flows, storage, and self-organized institutions for governing common-pool resources. *Land Econ.*, 70, 294–317
- Sellal A. 2005.** “Réserves d’eau en Algérie et la stratégie adoptée pour répondre au défi de demain“. In *Magazine de l’environnement* n°0 Avril 2005, ISSN n° 1112-4911, dépôt légal n° 1316
- Shah T. 2009.** Climate change and groundwater: India’s opportunities for mitigation and adaptation. *Environ. Res. Lett.*, 4, 35005
- Shah T. 2009.** *Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia. Resources for the Future Press: Washington, DC, 310 p.*
- Siderius C., Boonstra H., Munaswamy V., Ramana C., Kabat P., van Ierland E., Hellegers P. 2015.** Climate-smart tank irrigation: a multi-year analysis of improved conjunctive water use under high rainfall variability. *Agric. Water Manage.*, 148, 52–62, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.009>
- Siebert S., Burke J., Faures J.M., Frenken K., Hoogeveen J., Döll P., Portmann F.T. 2010.** Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, 14, 1863–1880
- Simonneaux V., Duchemin B., Helson D., Er-Raki S., Oliosio A., Chehbouni A.G. 2008.** The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 95-116
- Simonneaux V., Lepage M., Helson D., Métral J., Thomas S., Duchemin B., Cherkaoui M., Kharrou H., Berjami B., Chebhouni A. 2009.** Estimation spatialisée de l’évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection : Application à la gestion de l’irrigation dans la plaine du haouz (Marrakech, Morocco). *Sécheresse*, 20, 123–130
- Spitters C.J.T., Van Keulen H., Van Kraalingen D.W.G. 1989.** A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87, Simulation and systems management in crop protection, Pudoc Wageningen, 1989, 147-181
- Srinivasan R., Arnold J., Rosenthal W., Muttiah R.S. 1996.** Hydrologic Modeling of Texas Gulf Basin using GIS. In: Goodchild, et al. (Eds.), *GIS and Environmental Modeling Progress and Research Issues*. Donald F., Hemenway J., Fort Collins, 213–219
- Stedman L. 2007.** “FAO report warns of world-wide water stress“, <http://www.iwapublishing.com>



- Stefano C.D., Ferro V. 1997.** Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid Mediterranean areas. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68, 189–199
- Stewart J.B., Watts C.J., Rodriguez J.C., De Bruin H.A.R., van den Berg A.R., Garatuza-Payan J. 1999.** Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for Northwest Mexico. *Agricultural Water Manage.*, 38, 181–193
- Talia A. 2003.** Évolution des régimes pluviométrique et hydrologique du Nord de l'Algérie. Mémoire de Magister, Université de Mascara, 2003, 160 p.
- Toureiro C., Serralheiro R., Shahidian S., Sousa A. 2016.** Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agricultural Water Manage.*, 184, 211-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>
- Trawick P.B. 2001.** Successfully governing the commons: Principles of social organization in an Andean irrigation system. *Hum. Ecol.*, 29, 1–25
- Treyer S. 2006.** A quelle raréfaction de l'eau faut-il se préparer? Construire une intervention prospective au service de la planification pour les ressources en eau en Tunisie. Doctoral dissertation, ENGREF, AgroParisTech
- United Nations Population Fund (UNFPA). 1997.** Population and Sustainable Development, Five Years after Rio, UNFPA, New York
- Van der Hoek W., Hassan M.U., Ensink J.H., Feenstra S., Raschid-Sally L., Safraz Munir S., Aslam R., Hussain R., Matsuno Y. 2002.** Urban Wastewater: a Valuable Resource for Agriculture, a Case Study from Haroonabad, Pakistan. Research Report 63. IWMI: Colombo, SriLanka, 22 p.
- Wada Y., Beek L., Bierkens M.F. 2012.** No sustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48, 6
- Wada Y., Van Beek L.P., Van Kempen C.M., Reckman J.W., Vasak S., Bierkens M.F. 2010.** Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37, 20
- Willmott C.J., Ckleson S.G., Davis R.E., Feddema J.J., Klink K.M., Legates D.R., O'donnell J., Rowe C.M. 1985.** Statistiques pour l'évaluation et la comparaison des modèles. *Journal of Geophysical Research*, 90, C5, pp. 8995-9005
- Yasmi Y., Kelley L., Enters T. 2011.** Forest conflict in Asia and the role of collective action in its management. In : CAPRI Working Paper No. 102. Washington D.C. : International Food Policy Research Institute, <http://dx.doi.org/10.2499/CAPRIWP102>

- Yessad N. 2012.** Contribution à l'étude du financement et de la tarification dans le secteur de l'eau potable en Algérie : cas de l'Algérienne des Eaux. Mémoire de Magister en Sciences Économiques. Option : Économie de l'Environnement. université Abderrahmane Mira, Béjaïa
- Young G., Zavala H., Wandel J., Smit B., Salas S., Jimenez E., Fiebig M., Espinoza R., Diaz H., Cepeda J. 2010.** Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile. *Clim. Change*, 98, 245–276
- Zhang Y., Wegehenkel M. 2006.** Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. *Remote Sensing*, 104, 393-408

# **ANNEXES**

Tableau des quantités en eau d'irrigation réelles et simulées par SAMIR :

	date	irrigation simulée (m3) SAMIR	débit (réel) m3/h	durée irrigation réelle (h)	irrigation observée (m3)
1	02-mai-15	1086	207	4	828
2	03-mai-15	858	207	4	828
3	05-mai-15	932	207	4	828
4	06-mai-15	950	207	4	828
5	07-mai-15	874	207	4	828
6	08-mai-15	898	207	4	828
7	09-mai-15	1064	207	4	828
8	10-mai-15	858	207	4	828
9	12-mai-15	780	207	4	828
10	14-mai-15	806	207	4	828
11	18-mai-15	946	207	4	828
12	19-mai-15	1056	207	4	828
13	21-mai-15	900	207	4	828
14	22-mai-15	896	207	4	828
15	23-mai-15	796	207	4	828
16	24-mai-15	808	207	4	828
17	26-mai-15	890	207	4	828
18	27-mai-15	822	207	4	828
19	28-mai-15	852	207	4	828
20	29-mai-15	792	207	4	828
21	31-mai-15	944	207	4	828
22	04-juin-15	934	207	4	828
23	05-juin-15	910	207	4	828
24	06-juin-15	842	207	4	828
25	08-juin-15	914	207	4	828
26	09-juin-15	840	207	4	828
27	10-juin-15	784	207	4	828
28	11-juin-15	784	207	4	828
29	12-juin-15	938	207	4	828
30	13-juin-15	808	207	4	828
31	15-juin-15	910	207	4	828
32	16-juin-15	828	207	4	828
33	17-juin-15	848	207	4	828
34	18-juin-15	860	207	4	828
35	19-juin-15	792	207	4	828
36	20-juin-15	896	207	4	828
37	21-juin-15	1004	207	4	828
38	22-juin-15	852	207	4	828
39	24-juin-15	938	207	4	828
40	25-juin-15	808	207	4	828
41	27-juin-15	1036	207	4	828
42	28-juin-15	876	207	4	828
43	29-juin-15	840	207	4	828
44	30-juin-15	778	207	4	828

## Annexes

45	02-juil-15	966	207	4	828
46	03-juil-15	866	207	4	828
47	04-juil-15	796	207	4	828
48	05-juil-15	862	207	4,5	931,5
49	06-juil-15	830	207	4,5	931,5
50	07-juil-15	852	207	4,5	931,5
51	08-juil-15	932	207	4,5	931,5
52	09-juil-15	840	207	4,5	931,5
53	10-juil-15	776	207	4,5	931,5
54	11-juil-15	808	207	4,5	931,5
55	12-juil-15	792	207	4,5	931,5
56	13-juil-15	894	207	4,5	931,5
57	14-juil-15	814	207	4,5	931,5
58	15-juil-15	796	207	4,5	931,5
59	16-juil-15	822	207	4,5	931,5
60	17-juil-15	802	207	4,5	931,5
61	18-juil-15	750	207	4,5	931,5
62	19-juil-15	860	207	4,5	931,5
63	20-juil-15	972	207	4,5	931,5
64	21-juil-15	938	207	4,5	931,5
65	22-juil-15	876	207	4,5	931,5
66	23-juil-15	798	207	4,5	931,5
67	24-juil-15	818	207	4,5	931,5
68	25-juil-15	832	207	4,5	931,5
69	26-juil-15	768	207	4,5	931,5
70	28-juil-15	918	207	4,5	931,5
71	29-juil-15	944	207	4,5	931,5
72	30-juil-15	874	207	4,5	931,5
73	31-juil-15	876	207	4,5	931,5
74	01-août-15	788	207	4,5	931,5
75	02-août-15	854	207	4,5	931,5
76	03-août-15	862	207	4,5	931,5
77	04-août-15	982	207	4,5	931,5
78	05-août-15	1062	207	4,5	931,5
79	06-août-15	966	207	4,5	931,5
80	07-août-15	962	207	4,5	931,5
81	08-août-15	860	207	4	828
82	09-août-15	790	207	4	828
83	11-août-15	1048	207	4	828
84	12-août-15	1070	207	4	828
85	13-août-15	974	207	4	828
86	14-août-15	906	207	4	828
87	15-août-15	828	207	4	828
88	16-août-15	806	207	4	828
89	18-août-15	946	207	4	828
90	19-août-15	890	207	4	828

## Annexes

91	20-août-15	812	207	4	828
92	21-août-15	834	207	4	828
93	22-août-15	774	207	4	828
94	24-août-15	848	207	4	828
95	26-août-15	902	207	4	828
96	27-août-15	822	207	4	828
97	28-août-15	768	207	4	828
98	30-août-15	886	207	4	828
99	31-août-15	812	207	4	828
100	01-sept-15	836	207	4	828
101	02-sept-15	784	207	4	828
102	03-sept-15	854	207	4	828
103	04-sept-15	826	207	4	828
104	05-sept-15	804	207	4	828
105	07-sept-15	868	207	4	828
106	08-sept-15	798	207	4	828
107	10-sept-15	866	207	4	828
108	12-sept-15	950	207	4	828
109	13-sept-15	890	207	4	828
110	14-sept-15	850	207	4	828
111	15-sept-15	782	207	4	828
112	17-sept-15	850	207	4	828
113	18-sept-15	822	207	4	828
114	19-sept-15	650	207	4	828
115	22-sept-15	824	207	4	828
116	23-sept-15	740	207	4	828
117	24-sept-15	720	207	4	828
118	25-sept-15	702	207	4	828
119	26-sept-15	766	207	4	828
120	27-sept-15	730	207	4	828
121	29-sept-15	780	207	4	828
122	03-oct-15	850	207	3,5	724,5
123	07-oct-15	916	207	3,5	724,5
124	08-oct-15	914	207	3,5	724,5
125	09-oct-15	662	207	3,5	724,5
126	10-oct-15	500	207	3,5	724,5
127	20-oct-15	800	207	3,5	724,5
128	22-oct-15	770	207	3,5	724,5
129	27-oct-15	798	207	3,5	724,5
130	29-oct-15	758	207	3,5	724,5
131	30-oct-15	676	207	3,5	724,5
132	01-nov-15	764	207	3,5	724,5
133	05-nov-15	798	207	3,5	724,5
134	10-nov-15	816	207	3,5	724,5
135	26-nov-15	796	207	3,5	724,5
136	01-déc-15	858	207	3,5	724,5

## Annexes

137	02-déc-15	750	207	3,5	724,5
138	06-déc-15	848	207	3,5	724,5
139	07-déc-15	730	207	3,5	724,5
140	12-déc-15	786	207	3,5	724,5
141	15-déc-15	786	207	3,5	724,5
142	18-déc-15	780	207	3,5	724,5
143	21-déc-15	800	207	3,5	724,5
144	25-déc-15	898	207	3,5	724,5
145	27-déc-15	732	207	3,5	724,5
146	29-déc-15	792	207	3,5	724,5
147	01-janv-16	884	207	3,5	724,5
148	23-janv-16	876	207	3,5	724,5
149	25-janv-16	768	207	3,5	724,5
150	26-janv-16	738	207	3,5	724,5
151	31-janv-16	928	207	3,5	724,5
152	02-févr-16	774	207	3,5	724,5
153	04-févr-16	840	207	3,5	724,5
154	11-févr-16	830	207	3,5	724,5
155	12-févr-16	772	207	3,5	724,5
156	16-févr-16	854	207	4	828
157	20-mars-16	828	207	4	828
158	22-mars-16	834	207	4	828
159	24-mars-16	774	207	4	828
160	04-avr-16	750	207	4	828
161	07-avr-16	832	207	4	828
162	13-avr-16	900	207	4	828
163	15-avr-16	860	207	4	828
164	17-avr-16	818	207	4	828