

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach - Alger

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة – الحراش- الجزائر

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences
Agronomiques**

Département : Génie Rural

Spécialité : Hydraulique Agricole

THÈME

**Calcul de l'eau virtuelle agricole dans la wilaya de
Djelfa en vue de la détermination de son efficience
d'utilisation**

Présenté par : **M. IMESSAOUDENE Yassine**

Devant le Jury composé de:

Président : **M. SEMAR A.** Maître de conférences, ENSA Alger

Promoteur : **M. MOUHOUCHE B.** Professeur, ENSA Alger

Examineurs : **M. ZELLA L.** Professeur, Université de Blida

M. ELAHCENE O. Maître de conférences, Université de Djelfa

Année universitaire : 2013 - 2014

REMERCIEMENTS

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre bonheur, et la raison de notre existence. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les choses. Merci d'être là dans les moments les plus difficiles avant toutes personnes.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce travail.

En premier lieu, mes plus sincères remerciements et reconnaissances vont spécialement à mon promoteur M. MOUHOUCHE B. professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour sa générosité, sa gentillesse, sa présence et la qualité de son encadrement... de m'avoir dirigé et orienté avec ses précieux conseils.

M. SEMAR A. Maître de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique qui m'a fait l'honneur de présider le jury, et ainsi de juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à M. ZELLA L. professeur à l'université de Blida, M. ELAHCENE O. Maître de conférences à l'université de Djelfa, qui m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Je remercie l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique pour les diverses connaissances qu'ils m'ont transmis tout au long de mon cursus universitaire.

Je tiens à remercier M. Hamiche B. responsable des statistiques de la DSA (Djelfa) ainsi que tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce travail.

Tous mes amis et collègues.

✍ Yassine

Sommaire

Remerciements

	Page
Liste des abréviations et acronymes	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Introduction générale	1
Première partie : Synthèse bibliographique	
Chapitre I : Pilotage des ressources en eau en Algérie	3
1. Introduction	3
2. Les potentialités en eau	3
2.1. Eaux conventionnelles	4
2.1.1. Les eaux superficielles	4
2.1.2. Les eaux souterraines	5
2.2. Les eaux non conventionnelles	5
2.2.1. L'épuration des eaux usées	5
2.2.2. Dessalement de l'eau de mer	6
3. Alimentation en eau potable	6
4. L'Irrigation	7
5. Structures d'organisation et de gestion	7
6. Conclusion	8
Chapitre II : Les principaux problèmes de l'eau agricole en Algérie	10
1. Introduction	10
2. Facteurs climatiques	10
3. Les changements affectant les eaux de barrages	11
4. Les changements affectant les nappes phréatiques	12
5. Situation du secteur hydro-agricole	12
6. Tarification de L'eau agricole	14
7. Impact de la gestion de l'eau en agriculture sur l'environnement	15
8. Conclusion	15
Chapitre III : L'eau virtuelle	17
1. Introduction	17
2. Définitions	17
3. Composantes de l'eau virtuelle	18

4. L’empreinte de l’eau	20
4.1. L’intérêt d’estimation de l’empreinte sur l’eau	22
5. Les flux d'eau virtuelle dans le monde	23
5.1. L’importance de l’eau virtuelle dans la région méditerranéenne	23
5.2. L’importance de l’eau virtuelle dans le monde arabe	24
5.3. L’importance de l’eau virtuelle des céréales en Algérie	25
6. L’intérêt du concept de l’eau virtuelle	25
7. Conclusion	27

Deuxième partie : Matériel et méthode

Chapitre IV : Présentation de la zone d’étude	28
1. Situation géographique de la wilaya	28
2. Relief	30
3. Les sols	30
4. La végétation	30
5. Hydrologie	31
6. Hydrogéologie	31
7. Le climat	31
7.1. Précipitations	32
7.2. Températures	33
7.3. Les gelées	33
7.4. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN	34
7.5. Quotient pluviothermique et climagramme d’Emberger	34
8. Potentialités en eaux reconnues	35
9. Répartition générale des terres agricoles	36
9.1. Les superficies irriguées	36
9.2. Type d’irrigation	36
10. Conclusion	37
Chapitre V : Présentation du logiciel Cropwat 8.0	38
1. Logiciel Cropwat	38
2. Les données utilisées par le logiciel Cropwat dans le calcul des besoins	38
2.1. Les données climatiques	38
2.2. Les données liées au sol	39
2.3 Les données liées à la culture	40
2.3.1. Date de semis, de plantation ou de reverdissement	42

2.3.2. Les phases de développement	42
2.3.3. Le coefficient cultural (kc)	42
2.3.4. Tarsissement admissible du sol (P)	44
2.3.5. Coefficient de réponse du rendement à l'eau (kY)	45
3. Calcul de l'évapotranspiration de référence	45
4. Critères de la conduite des irrigations	45
4.1. L'évapotranspiration maximale	45
4.2. Pluie efficace	46
5. Calcul des besoins nets en eau d'irrigation	47
6. Calendrier d'irrigation	47
7. Efficacité d'irrigation	48
8. Calcul de l'efficacité d'utilisation de l'eau EUE	48

Troisième partie : Résultats et discussions

1. Traitement des données pluviométriques	49
1.1. Calcul de la pluie efficace	49
1.2. Détermination de l'année sèche et de l'année humide	49
2. Calcul des besoins en eau d'irrigation	52
2.1. Estimation de la demande climatique ET_0	52
2.2. Besoins en eau des cultures ETM	54
2.3. Besoins en eau d'irrigation	55
3. Calcul de l'eau virtuelle par culture	56
3.1. Les céréales	56
3.2. Les cultures fourragères	58
3.3. Les arbres fruitiers	58
3.3.1. L'olivier	59
3.3.2. Les espèces à pépins	59
3.3.3. Les espèces à noyaux	60
3.4. Les cultures maraîchères	60
3.4.1. Oignon et ail	61
3.4.2. Pomme de terre	61
3.4.3. Carottes	61
3.4.4. Tomates	61
3.4.5. Poivrons et piments	62
3.4.6. Melon et pastèque	62

3.4.7. Courgette et concombre	62
3.4.8. Navets	63
3.4.9. Laitue	63
3.5. Les parcours	63
4. Calcul des quantités d'eau virtuelle par secteur	64
5. Quantité d'eau virtuelle agricole sur année humide, normale et sèche	65
6. Efficience d'utilisation de l'eau EUE	65
6.1. Les céréales	66
6.1.1. Efficience des céréales conduites en pluviale	66
6.1.2. Efficience des céréales en irriguée	66
6.2. Les cultures fourragères	67
6.3. Les arbres fruitiers	67
6.4. Les cultures maraîchères	68
Conclusion générale	70
Références bibliographiques	72
Annexes	76
Résumé	81

Liste des abréviations et acronymes

ABH : Agence des Bassins Hydrographiques.

ADE : Algérienne des eaux.

AEP : Alimentation en eau potable.

AGEP : Agence Générale de l'eau potable

ANAT : Agence Nationale de l'Aménagement et du Territoire.

ANBT : Agence nationale des barrages et transferts.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Arri-sai : Arrière saison.

BI : Besoin d'Irrigation.

CDFD : Conservation Des Forêts de la wilaya de Djelfa.

CNES : Conseil National Economique et Social.

Dév : Développement.

DHA : Direction de l'Hydraulique Agricole.

DPAT : Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire.

DSA : Direction des Services Agricoles.

EPIC : Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial.

ET₀ : Evapotranspiration potentielle.

ET_c : Evapotranspiration de la culture.

ETM : Evapotranspiration maximale.

EUE : Efficience d'utilisation de l'eau.

FAO : Organisation Mondiale de l'Alimentation et l'Agriculture.

FNDRA : Fonds national de développement rural et agricole.

GPI : Grand Périmètre Irrigué.

H : humidité relative.

IHE : Institut de l'ingénierie hydraulique.

Init : Initial.

Inso : Insolation.

Irr : Irriguée.

IWMI : Institut international pour la gestion de l'eau.

kc : Coefficient cultural

MENA: Middle-Est and North Africa.

MADR : Ministère de l'Agriculture et de Développement Rural.

Mi-sai : Mi-saison.

MRE : Ministère des Ressources en Eaux.

ONA : Office National d'Assainissement

ONID : Organisme National d'Irrigation et de Drainage

ONM : Office National de la Météorologie.

P : Précipitation.

PDARE : Plan Directeur d'Aménagement des Ressources en Eau.

P_{eff} : Pluie efficace.

PMH : Petite et Moyenne Hydraulique.

PNE : Plan National de l'Eau.

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

Rdt. : Rendement.

REUE : Réutilisation des Eaux Usées Epurées.

RFU : Réserve facilement utilisable.

RU : Réserve Utile.

SAT : Surface Agricole Totale.

SAU : Surface Agricole Utile.

SOAS: School of Oriental and African Studies.

STEP : Station d'Épuration.

Surf : Surface.

T : Température.

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

USDA : Département Américain de l'Agriculture.

V : Vitesse de vent.

Liste des figures

	Page
Figure 1 : Mobilisation des ressources en eau superficielles et barrages.	4
Figure 2 : Exploitation des nappes par région.	5
Figure 3 : Eau verte, eau bleue et eau évapotranspirée.	19
Figure 4 : Empreinte sur l'eau de quelques pays.	21
Figure 5 : Situation géographique de la wilaya de Djelfa.	28
Figure 6 : Occupation des sols de la wilaya de Djelfa.	29
Figure 7 : Evolution de la pluviométrie annuelle (1975-2009).	32
Figure 8 : Pluviométries mensuelles moyennes interannuelles (1975-2009).	32
Figure 9 : Evolution des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1975-2009).	33
Figure 10 : Diagramme ombrothermique moyen (1975-2009).	34
Figure 11 : Climagramme d'Emberger.	35
Figure 12 : Superficies irriguées par système d'irrigation de la campagne (2011-2012).	37
Figure 13: Données liées à la culture sur Cropwat.	43
Figure 14 : Etude fréquentielle des pluies moyennes annuelles.	51
Figure 15 : Evolution de L'ET ₀ mensuelle dans la wilaya de Djelfa.	53
Figure 16 : Besoins en eau annuels par culture dans la zone d'étude.	54
Figure 17 : Répartition de la superficie moyenne des céréales (2009-2012).	57
Figure 18 : Eau virtuelle agricole par secteur dans la wilaya de Djelfa.	64
Figure 19 : Répartition de l'eau verte et bleue (Hm ³) sur une année humide normale et sèche.	65

Liste des tableaux

	Page
Tableau 1 : Valorisation du m ³ d'eau d'irrigation dans la plaine de la Mitidja.	15
Tableau 2 : Quantité d'eau par produit.	18
Tableau 3 : Volume d'eau virtuelle dans le monde arabe.	24
Tableau 4 : Nombre de jours mensuels de gelée (1990-2009).	33
Tableau 5: Besoins en eau pour l'alimentation en eau potable.	36
Tableau 6: Répartition générale des terres (ha).	36
Tableau 7: Répartition de la superficie irriguée par type de culture (ha) (2011-2012).	36
Tableau 8: Les 5 données climatiques entrées dans le Cropwat.	39
Tableau 9: Les profondeurs d'enracinement des principales cultures.	40
Tableau 10 : Les données liées au sol proposées dans le Cropwat.	40
Tableau 11: Répartition des surfaces cultivées dans la wilaya de Djelfa.	41
Tableau 12 : Synthèses des données liées aux cultures.	44
Tableau 13 : Calcul de la pluie efficace (mm) (1975 - 2009).	49
Tableau 14 : Calcul des fréquences au dépassement.	51
Tableau 15 : Les pluies mensuelles de l'année sèche et humide (en mm).	52
Tableau 16 : Données climatiques de la wilaya de Djelfa (1979-2009).	53
Tableau 17 : Besoins en eau d'irrigation (mm).	55
Tableau 18 : Volume de l'eau verte et de l'eau bleue des céréales (Hm ³).	57
Tableau 19 : Volume d'eau verte et d'eau bleue des arbres fruitiers (Hm ³).	59
Tableau 20 : Volume de l'eau verte et de l'eau bleue (m ³).	60
Tableau 21 : Efficience d'utilisation de l'eau des arbres fruitiers dans la wilaya de Djelfa.	67
Tableau 22 : Efficience d'utilisation de l'eau des cultures maraichères dans la wilaya de Djelfa.	68

Introduction générale

Introduction générale

Bien qu'apparemment inépuisable, l'eau est très inégalement répartie dans le monde. Au vu du développement industriel et de la demande de plus en plus croissante, tous les pays auront, à plus ou moins brève échéance, à faire face au problème de son manque.

En Algérie, le secteur de l'eau fait l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs publics qui lui consacrent des moyens de plus en plus importants. La construction de nouveaux barrages, la réalisation de grands transferts régionaux et de grandes adductions urbaines et agricoles, des usines de dessalement ont permis d'augmenter nettement le volume des ressources en eau mobilisées et d'améliorer les conditions d'approvisionnement des régions et des agglomérations déficitaires.

L'eau virtuelle est un concept que l'on doit à J.A. Allan dont les travaux, dans le cadre de la SOAS, développés au Moyen-Orient, en Afrique du Nord et du Sud, visent à analyser le management de la demande en eau avec des approches relevant des sciences politiques et de l'économie institutionnelle, pour lesquels il réalise des missions d'expertise auprès des gouvernements.

L'eau virtuelle se définit comme la quantité d'eau nécessaire à la production d'un bien. Dans le cas de la production agricole, il s'agit de l'eau évapotranspirée par les cultures (Allan, 1993). Elle dépend en particulier du savoir faire de ses producteurs et de sa zone climatique de production, les climats chauds et secs induisent les plus fortes consommations. (Fernandez, 2007).

L'Algérie se caractérise par une diversité climatique du Nord au Sud et de l'Ouest vers l'Est avec prédominance de l'aridité sur plus de 90% du territoire national, des précipitations irrégulières aux plans temporel et spatial.

Les céréales importées constituent une part importante de l'eau virtuelle consommée au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, qui importaient déjà 50 millions de tonnes de céréales par an dès 2000 (UNESCO, 2012). Le recours à l'importation dans les pays du Moyen-Orient constitue, selon Allan (1997), un indicateur de la pénurie d'eau à laquelle ils font face.

Le concept de l'eau virtuelle est principalement appliqué à l'agriculture car celle-ci est responsable de la plus grande part des prélèvements (70 % en moyenne à l'échelle mondiale)

(Fernandez, 2007). Les importations ou exportations de produits agricoles et alimentaires sont alors considérées comme des transferts des quantités d'eau qui en ont permis la production (Troy, 2012).

L'Algérie a eu toujours recours à l'importation des produits alimentaires, particulièrement les céréales. De ce fait, 4,9 millions de tonnes de céréales importées soit 5,5 milliards de m³ d'eau virtuelle, donc la production d'un kg de céréales importée nécessite un volume de 1,1 m³ dans les conditions des pays exportateurs (Lani, 2011). La production d'une même quantité de céréales peut exiger de deux à trois fois plus d'eau dans un pays aride que dans un pays au climat humide (Hoekstra, 2003 ; Roch et Gendron 2005).

A l'échelle régionale, la détermination des quantités d'eau virtuelles se fait par le calcul des besoins en eau unitaires relatifs à l'hectare irrigué et des pluies totales sur la culture envisagée.

La quantification des volumes d'eau virtuelle agricole des cultures pratiquées dans la wilaya de Djelfa met en évidence l'importance quantitative de ces volumes d'eau au regard des ressources en eau disponibles dans la wilaya, ainsi que l'intérêt que peut présenter le concept d'eau virtuelle comme outil d'analyse et d'aide à la décision en matière de gestion et de répartition de l'eau en situation de pénurie. Cela implique le plus souvent la recherche de l'optimisation des consommations et la réduction des gaspillages.

Notre travail s'inscrit dans cette optique, qui vise à déterminer l'eau virtuelle des principales cultures pratiquées dans la région de Djelfa et son efficacité d'utilisation. Pour cela, la démarche suivie pour réaliser ce travail repose sur trois parties :

Dans la première partie, nous décrivons en générale, le pilotage des ressources en eau du pays, les principaux problèmes de l'eau agricole, et le concept de « l'eau virtuelle » comme palliatif au manque d'eau en agriculture.

Nous établirons par suite dans la deuxième partie une présentation de la wilaya de Djelfa et une description de la méthode et les données utilisées pour l'estimation des besoins en eau par le logiciel « Cropwat 8.0 » de la FAO (2009).

La dernière partie a été consacrée pour l'analyse des résultats concernant le calcul de l'eau virtuelle (besoins en eau), et l'efficacité d'utilisation de l'eau des principales cultures pratiquées dans la zone d'étude.

Première partie :

Synthèse bibliographique

Chapitre I :

Pilotage des ressources en eau en Algérie

Chapitre 1 : Pilotage des ressources en eau en Algérie

1. Introduction

L'Algérie est classée parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an. De part son appartenance à la zone géographique du MENA et la quasi-totalité de son territoire classé en zone désertique, sa pluviométrie moyenne annuelle est estimée à 89 mm (FAO, 2005). De ce fait, l'Algérie est classée parmi les 13 pays africains qui souffrent le plus du manque d'eau.

D'après Mouhouche (2008), il faudra mobiliser entre 15 et 20 milliards de m³/an pour assurer sa sécurité alimentaire à la fin de la prochaine décennie, tout en sachant que la mobilisation actuelle n'est que de l'ordre de 4 à 5 milliards de m³/an.

L'évolution considérable de la demande en eau en Algérie, liée principalement à l'accroissement rapide de la population, au développement de l'urbanisation mais aussi à l'élévation du niveau de vie, a conduit le pays à accroître les capacités de stockage des eaux de surface, augmenter l'exploitation des nappes souterraines et réaliser des adductions et des transferts de volumes importants sur des distances de plus en plus grandes, à titre d'exemple, le projet de transfert d'eau potable par une conduite de 700 km en double canalisation de In-Salah à Tamanrasset. Les dépenses publiques liées à l'eau ont augmenté régulièrement durant la présente décennie.

2. Les potentialités en eau

Les ressources en eau superficielles et souterraines, en Algérie, sont estimées à environ 19,2 milliards de m³. En tenant compte de la sécheresse des 25 dernières années, les estimations des potentialités ont été revues à la baisse, et seraient environ de 17 milliards de m³/an (MADR, 2007).

Les ressources sont réparties comme suit : 13.5 milliards de m³ d'eau de surface et 3.3 milliards de m³ d'eau souterraine. Seuls 80% de ce potentiel est renouvelable (70% pour les eaux de surfaces et 10% pour les eaux souterraines) et elles se concentrent dans la frange septentrionale du pays, qui s'étend sur environ 300 000 km², soit 13% de la superficie du pays (Loucif, 2003).

La demande globale en eau a considérablement et rapidement augmenté. Multipliée par 4 au cours des quarante dernières années, elle dépasse actuellement plus de la moitié du volume des ressources potentiellement mobilisables. A cet effet, la part que prend l'alimentation en eau potable s'est considérablement accrue en volume et en proportion. De 16 % de la consommation globale en 1975, elle est passée à 35 % actuellement. Durant la même période, la part de l'eau agricole a chuté de 80 % à 60 %, celle de l'industrie restant égale à 3,5 % (Benblidia, 2011).

Le développement économique et social, la croissance des villes, des industries ainsi que la modernisation de l'agriculture et le développement des loisirs entraînent un accroissement considérable de la demande en eau. (Kettab, 2001). Pour tenter d'élucider ce problème, il est indispensable d'établir un inventaire, des ressources en eau superficielle et souterraine.

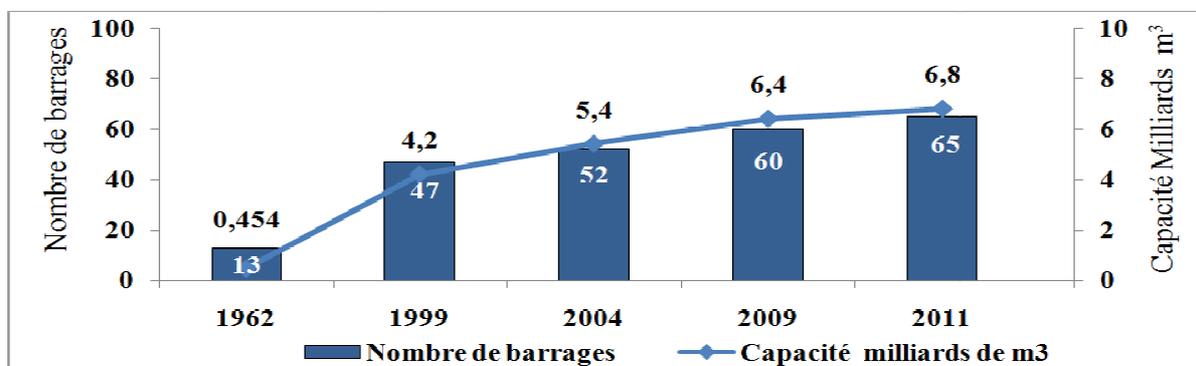
2.1. Eaux conventionnelles

2.1.1. Les eaux superficielles

L'Algérie est un pays semi-aride, voire même aride et les ressources en eau sont faibles, irrégulières, et localisées dans la bande côtière. Du fait de l'envasement rapide, ces retenues ont beaucoup perdu de leur capacité initiale, à raison de 2 à 3 % par an en moyenne (Remini et al, 2009).

A l'état actuel, ils existent 65 grands barrages de capacité 6,8 milliards m³, destinés à l'AEP et l'irrigation (Figure 1).

A court terme, le nombre peut atteindre 93 grands barrages de capacité de 9,1 milliards m³ d'eaux superficielles mobilisées (Lehtihet, 2012).



Source : Lehtihet, 2012.

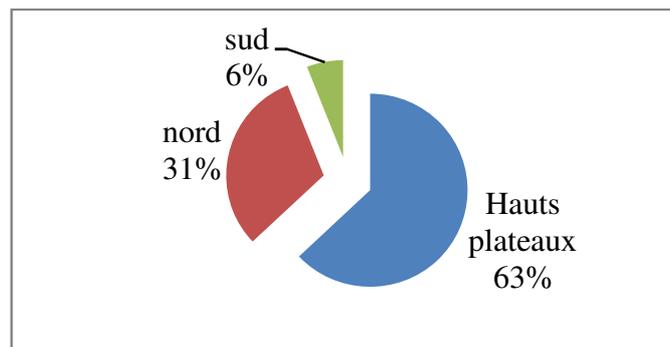
Figure 1: Mobilisation des ressources en eau superficielles et barrages.

Afin d'atténuer le déficit constaté dans la confrontation « besoins / ressources », l'Algérie a entrepris un ambitieux programme de mobilisation complémentaire devant permettre à l'horizon 2030 la mobilisation de quelques 2 milliards de m³ supplémentaires (Demmak, 2010).

2.1.2. Les eaux souterraines

Dans la partie nord du pays, les 177 unités hydrogéologiques peuvent emmagasiner des ressources exploitables de 2 724 Hm³/an, en année moyenne, et de 762 Hm³/an en année sèche. Les estimations faites pour les 29 unités hydrogéologiques de l'extrême sud, montrent que leurs ressources sont de l'ordre de 257 Hm³/an, quelque soit la période (Mehdid, 2010).

D'après Lehtihet (2012), environ 68% des nappes sont exploitées dans la région des hauts plateaux (Figure 2).



Source : Lehtihet, 2012.

Figure 2 : Exploitation des nappes par région.

2.2. Les eaux non conventionnelles

2.2.1. L'épuration des eaux usées

Le volume épuré est passé de 90 Hm³/an au début des années 2000 à 400 Hm³ aujourd'hui. On recense un total de 102 unités, dotées d'une capacité installée globale de 600 Hm³. Le programme en cours (40 STEP à réaliser) permet d'atteindre très prochainement une capacité d'épuration de 750 Hm³, 900 Hm³ en 2015 et 1200 Hm³ en 2020 (Mebarki, 2010).

Malgré le nombre important de stations d'épuration, la moitié étaient à l'arrêt ou fonctionnaient avec des rendements trop faibles générant ainsi de multiples sources de nuisances quant à l'environnement et aux infrastructures à l'aval (Rouissat, 2009).

Au-delà de l'impact écologique, les eaux usées épurées permettent de développer la mise en valeur agricole, en particulier dans les régions déficitaires (à l'exemple du projet d'irrigation de 5 000 ha dans la plaine de Mleta à partir des eaux épurées de la ville d'Oran ou le projet d'irrigation de 400 hectares de l'aire du Hamma à partir de la STEP de la ville de Constantine) (Mebarki, 2010).

2.2.2. Dessalement de l'eau de mer

Ce programme stratégique est destiné à libérer le pays de la dépendance de la pluviométrie pour l'alimentation en eau potable des populations des régions côtières, et notamment dans l'ouest du pays qui souffre d'un grave déficit chronique en pluviométrie. Deux stations sur les 13 sont déjà en production à savoir celle d'Arzew pour Oran et celle de Hamma pour Alger, alors que près de 10 contrats de réalisation ont déjà été conclus avec des chantiers lancés et en voie d'achèvement (Rouissat, 2009).

La stratégie nationale consiste en un programme ambitieux d'installation d'usines de dessalement de petite et de grande taille dont la somme des capacités nominales s'établit à 2,3 millions de m³ par jour, ce qui représente 0,860 milliards de m³ par an (Djebbar, 2010).

3. Alimentation en eau potable

En 2000, près de 82% de la population étaient raccordés au réseau d'AEP et 73% au réseau d'assainissement. L'Algérie enregistrait un taux de raccordement global de 83 %, alors que la moyenne mondiale se situe à 75%. Notons aussi que la proportion de la population privée d'accès à l'eau potable a diminué de plus de 2/3 entre 1998 et 2008, passant de 17% à 5% (CNES, 2008).

La gestion de l'AEP a été confiée au niveau national à l'Entreprise Publique ADE) Depuis 2006, l'ADE ne gère plus directement les services d'eau des 4 grandes agglomérations (Alger, Oran, Constantine et Annaba) dont la responsabilité est confiée respectivement à 4 sociétés publiques, filiales à 50 % de l'ADE et de l'ONA. La gestion de l'eau potable dans ces quatre villes est assurée actuellement en partenariat avec des entreprises privées internationales dans le cadre d'un contrat de management.

Une partie seulement de l'eau potable produite est réellement distribuée aux usagers en raison des fuites dans les réseaux ; les taux de pertes sont très importants, atteignant dans certains cas 50% (Benblidia et Thivet, 2010).

4. L'Irrigation

L'agriculture irriguée n'occupe actuellement que 5 à 7% des superficies cultivées, mais joue un rôle économique important dans la mesure où elle représente près de 50% de la valeur ajoutée agricole du pays (Benblidia et Thivet, 2010).

Les périmètres d'irrigation en Algérie sont classés en deux grandes catégories :

Les GPI dépassant en général 500 ha d'un seul tenant, alimentés en eau à partir de barrages ou de batteries de forages profonds avec d'importants investissements collectifs totalement réalisés par l'Etat et souvent, pour ne pas dire toujours à fond perdu, puisque ces investissements ne rentrent pas dans la tarification de l'eau d'irrigation.

Les PMH dont les surfaces éparses sont en majorité inférieures à 500 ha. Une partie ou la totalité des investissements est réalisée par les agriculteurs, les ressources en eau ont des origines diverses : puits, petits forages, retenues collinaires, épandages de crue, ghotts des régions sahariennes

En ce qui concerne les GPI, les années de sécheresse, l'envasement des retenues, les pertes au niveau des réseaux d'irrigation mal entretenus et, en dernier ressort, la priorité donnée à l'AEP, ont fait que l'eau des barrages allouée à l'irrigation a toujours été très en deçà des besoins, qui auraient permis l'irrigation de la totalité des surfaces irrigables. Il en résulte une anomalie de la gestion d'autant plus importante que l'ONID, chargé d'administrer les GPI, ne parvient pas à récupérer la totalité de la redevance du service et plusieurs GPI sont en situation de faillite financière. Ajouté à cela le fait que l'eau d'irrigation est facturée à 2 ou 2,5 DA le m³ seulement (décret de 2005) (Mouhouche et Guemraoui, 2004).

5. Structures d'organisation et de gestion

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). Instrument juridique à double finalité, normative et de politique sectorielle, 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 règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau en tant que bien de la collectivité nationale (Benblidia et Thivet, 2010).

Depuis le transfert du secteur de l'irrigation qui relevait du Ministère de l'Agriculture, le MRE est le principal responsable de la politique de l'eau dont il assure l'élaboration et la mise en œuvre. Sa compétence s'étend à l'ensemble des activités relatives à la recherche, l'exploitation, le stockage, la distribution de l'eau pour tous les usages, à l'assainissement. Il veille, avec les ministères chargés de l'environnement et de la santé, à la préservation de la qualité des ressources en eau et à leur protection contre les pollutions (Benblidia, 2011).

Le ministère des ressources en eau coordonne l'ensemble des activités liées à l'eau au niveau national, chaque wilaya a une direction de l'hydraulique. Il existe aussi des sociétés nationales telles l'ANBT, l'AGEP, ... des entreprises de wilaya et depuis 1996, il existe un nouveau découpage par bassin hydrographique. Ainsi cinq régions de bassins hydrographiques et cinq comités de bassins ont été définis (1-Oranie-Chott Chergui; 2-Cheliff Zahrez; 3- Algerois-Hodna-Soummam; 4- Constantinois- Seybousse-Mellegue; 5-Sahara) afin d'assurer une gestion intégrée des ressources en eau. Des agences de bassin sont donc créées avec mise en place progressive de dispositifs et d'outils réglementaires pour la gestion quantitative et qualitative de l'eau. Le statut de ces agences de bassins hydrographiques est un EPIC.

Depuis 1996, l'Algérie s'est fortement engagée dans la voie de la gestion intégrée des ressources en eau. Les principes de valeur économique de l'eau, d'unicité de gestion à l'intérieur de territoires cohérents (les bassins hydrographiques), de concertation, d'éducation du public ont été consacrés par des textes législatifs et réglementaires et des structures ont été mises en place, en vue de leur application. Le concept de gestion intégrée n'est pas simple, tant il a de dimensions politique, économique, technique, sociale et culturelle (Boukhari et al, 2008).

6. Conclusion

Il est clair et indéniable qu'il ne peut y avoir de développement durable sans la maîtrise de la ressource en eau particulièrement pour les pays arides et semi arides

La politique nationale de l'eau en Algérie a été davantage axée, jusqu'à présent, sur la gestion par l'offre plutôt que sur une gestion de la demande.

Depuis une dizaine d'années, des efforts considérables ont été déployés en Algérie pour satisfaire au mieux les besoins en eau des populations et assurer ceux du développement économique. Le principal objectif des responsables du secteur a donc été de mobiliser le

maximum de ressources en eau renouvelables et, si nécessaire, d'avoir recours à d'autres ressources non conventionnelles.

Mais peu à peu, les orientations de la politique de l'eau évoluent pour faire face à la dégradation de la distribution dans les villes, aux conséquences d'un assainissement défectueux sur les conditions de vie et de santé des populations, à l'inefficacité persistante de l'irrigation dans les grands périmètres et à la pollution grandissante des ressources hydriques. L'amélioration de la gestion des services de l'eau aux différents usagers s'inscrit désormais dans les priorités de la politique de l'eau en Algérie.

Chapitre II :

Les principaux problèmes de l'eau agricole en Algérie

Chapitre II : Les principaux problèmes de l'eau agricole en Algérie

1. Introduction

L'Algérie est confrontée à la rareté de l'eau, facteur limitant du développement et source de tensions sociales. La rareté est mesurée en termes de stress hydrique et d'irrégularité de la ressource, deux facteurs susceptibles de s'accroître avec le changement climatique (Mebarki, 2010).

Le problème de l'eau a commencé à se poser avec acuité durant cette dernière décennie qui est caractérisée par une sécheresse persistante provoquant la diminution des ressources en eau. Sur le plan pluviométrique, celui-ci se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les ressources en eau deviennent de plus en plus limitées, leurs utilisations délicates et les besoins, autrefois essentiellement agricole (irrigation) se diversifient et s'accroissent rapidement (Loucif, 2003).

2. Facteurs climatiques

En Algérie, les changements climatiques de ces dernières décennies ont eu une influence négative sur la ressource hydraulique (recharge des nappes et remplissage des barrages réservoirs) et sur le rendement agricole (Khaldi, 2005).

Des phénomènes climatiques extrêmes tels que les gels hâtifs et tardifs, la sécheresse et les inondations représentent une sérieuse menace pour la production agricole. Cependant, aucun phénomène n'a été plus dévastateur à grande échelle que la sécheresse en Algérie, qui entraîne des pertes directes sur la production agricole.

Par son appartenance géographique à la zone aride et semi-aride, l'Algérie est soumise à des conditions physiques et hydro climatiques défavorables, accentuées par des périodes de sécheresses chroniques. L'Algérie présente une grande sensibilité au climat, notamment dans les hauts plateaux et la steppe qui couvrent environ 60% des terres viables du Nord (PNUD, 2009).

L'intensification des sécheresses et des déficits hydriques placent les usages agricoles de l'eau sous une pression croissante et on s'attend à ce que l'augmentation de la compétition entre les usages alternatifs conduise à des transferts des dotations agricoles vers les secteurs industriels, municipaux et touristiques (Yang et Zehnder, 2002).

La sécheresse intense et persistante, observée en Algérie durant les 30 dernières années et caractérisée par un déficit pluviométrique évalué à 30% (50% durant l'année 2001-2002), a eu un impact négatif sur les régimes d'écoulement des cours d'eau, entraînant des conséquences graves sur l'ensemble des activités socio-économiques du pays (PNUD, 2009).

Pour les bassins versants nord africain, les modèles hydrologiques anticipent une réduction des écoulements de surface de 10 à 15% pour un réchauffement de 1°C et une baisse de la pluviométrie comprise en 0 et 5%.

En Algérie les projections des déficits des apports en eaux superficielles s'élèvent à 15 et 30% pour des scénarios de réchauffement de 0,5 et 1°C et de réduction des précipitations de 10 et 15% (MATE, 2001).

Les récentes fluctuations climatiques et les sécheresses, plus fréquentes au cours des trois dernières décennies, ont accentué le phénomène de dégradation des sols, engendrant ainsi la désertification des zones vulnérables comme les steppes et les hautes plaines. La tendance actuelle à des inondations plus intenses pourrait entraîner une érosion et une dégradation des sols plus importantes. Ces terres constituent de véritables potentiels agricoles et doivent assurer la sécurité alimentaire du pays ainsi que la protection de la frange côtière.

3. Les changements affectant les eaux de barrages

Les changements affectant la retenue des eaux de surface sont dus à l'envasement et à la diminution du ruissellement.

La nature et la morphologie des terrains en pente, la fragilité du couvert végétal, le manque de boisement et l'urbanisation en amont des barrages engendrent une forte érosion qui réduit la capacité de stockage des barrages de 2 à 3% chaque année, à cause de l'envasement dû au transport et au dépôt de sédiments par les eaux de pluie. Actuellement, 14 barrages sur la soixantaine existante sont envasés (PNUD, 2009).

L'effet négatif de l'envasement des barrages en Algérie constitue un obstacle majeur pour la régénération de réserves en eau superficielles, sachant que les nouvelles sources d'approvisionnement sont de plus en plus coûteuses à exploiter en raison de leur éloignement ou de leur inaccessibilité (Demmak, 2010).

Le problème des barrages touchés par le phénomène d'envasement a été traité pour les cas les plus graves. Ainsi le phénomène d'envasement, si rien n'est entrepris, pourrait entraîner à l'horizon 2030, pour une dizaine de barrages en Algérie une réduction des capacités de régularisation pouvant aller de 10 à 30% (Demmak, 2011).

4. Les changements affectant les nappes phréatiques

En Algérie, la demande en eau et la sécheresse associées ont causé une diminution de la ressource en eau souterraine. La pénurie de ressources hydriques superficielles a entraîné, pendant les dernières années, une exploitation intensive des nappes souterraines surtout à usage agricole, ce qui a produit de fortes baisses de niveaux phréatiques (Khaldi, 2005).

L'aggravation des sécheresses conjuguée à la surexploitation des nappes phréatiques a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides comme le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. Le taux moyen d'utilisation des nappes phréatiques est de 79% dans la région Nord, il peut parfois atteindre et dépasser les 90% dans certaines zones (PNUD, 2009).

5. Situation du secteur hydro-agricole

Le secteur hydro-agricole en Algérie, en particulier sur les grands périmètres irrigués, fait face à de grandes difficultés, d'ordres technique, financier et organisationnel (Benblidia, et Thivet, 2010).

La sécheresse qui a sévi ces dernières années justifie partiellement cette limitation des ressources en eau et la faiblesse des superficies irriguées dans l'ensemble du pays, mais elle est aggravée par de nombreux facteurs externes au secteur hydro-agricole, notamment :

- Le défaut dans la planification des ouvrages (mobilisation, transfert, irrigation. . .), lié notamment au manque de coordination sectorielle et intersectorielle. La pénurie d'eau peut être ainsi le résultat de retards dans la mise en service des ouvrages de mobilisation et de transfert de la ressource (cas de la Mitidja). Des efforts en vue d'une meilleure planification ont toutefois été réalisés en 2002, avec un travail de coordination dans le cadre d'un groupe de réflexion interministériel ;
- Les conflits avec les autres usages. L'adduction d'eau potable (AEP) et les usages industriels sont prioritaires, les dotations à l'irrigation, décidées chaque année par

arbitrage du MRE, se voient très souvent limitées à la portion congrue, ne permettant même pas une irrigation de “ survie ” ;

- L'absence d'outils pour gérer cette situation (prévision, définition des règles de gestion de la pénurie, communication, tarification) ;

A ces facteurs externes, il faut également ajouter d'autres facteurs internes au système, qui pénalisent aussi l'efficacité de l'irrigation : la dégradation alarmante des infrastructures par manque d'entretien, qui est liée évidemment au manque de moyens ; les importantes pertes dans les réseaux ; les gaspillages facilités par le prix bas de l'eau à usage agricole (Mouhouche et Guemraoui, 2004).

Toutefois, avec la nouvelle politique de l'eau, les GPI sont supposés bénéficier dans l'avenir surtout de la réaffectation de barrages à l'irrigation, mais aussi de la production des nouvelles ressources d'eau non conventionnelles, soit indirectement (nouvelles stations de dessalement pour l'AEP permettant de récupérer des affectations des barrages), soit directement, via la réutilisation des eaux usées épurées. Ainsi les ABH, dans leur PDARE envisagent-elles maintenant un néo-développement ambitieux de la grande irrigation avec optimisme, à l'unisson avec la DHA du MRE, et de manière plus pondérée avec le MADR (Benfares et Potin, 2010).

Le secteur de la PMH est très dynamique et contribue pour une large part à l'approvisionnement en fruits et légumes. Il bénéficie de subventions d'investissement importantes (jusqu'à 80%) octroyées par le Fonds national de développement rural et agricole (FNDRA). Cependant, le développement de la PMH, qui utilise principalement les eaux souterraines, risque d'avoir des impacts négatifs sur les nappes dont la plupart est déjà surexploitée (FAO, 2005).

6. Tarification de L'eau agricole

La tarification de l'eau en Algérie est, conformément au code des eaux, fixée par voie réglementaire. Un arrêté ministériel du 11 avril 1995 fixe le prix de l'eau à usage agricole effectivement consommé à 1,00 à 1,25 DA/m³ d'eau selon le mode d'irrigation. Ces tarifs ont été calculés d'après les charges d'exploitation de l'exercice 1993. Depuis, les coûts d'exploitation ont connu une augmentation significative, notamment, l'énergie électrique et les salaires.

Les tarifs de l'eau agricole n'ont pas évolué depuis pratiquement une décennie, alors que les prix de certains intrants ont subi des hausses spectaculaires depuis 1988.

Les demandes de subventions des offices, justifiées par leur mission de service public, les prix administrés, et les déficits des bilans d'exploitation, accentués par une longue période de sécheresse ont montré que ces tarifs sont nettement insuffisants pour permettre aux offices de bien gérer les périmètres qui leur sont concédés. Actuellement, on estime que ces tarifs ne permettent de couvrir que 50 % des charges d'exploitation (Mouhouche et Guemraoui, 2004)

Il faut signaler très clairement que les entreprises de gestion des réseaux d'irrigation et/ou AEP ne peuvent agir pour mobiliser, stocker, transporter et distribuer l'eau durablement que si elles ont les moyens humains, financiers et matériels nécessaires pour le faire. Pour cela, le prix du m³ d'eau doit, non seulement refléter sa valeur réelle, mais surtout sa productivité.

Malheureusement, les tarifs du m³ d'eau pratiqués depuis l'indépendance (particulièrement en agriculture) montre que l'eau, en Algérie n'a jamais eu sa vraie valeur, ce qui a provoqué une mauvaise gestion des ressources hydriques, particulièrement en ce qui concerne :

- Les techniques traditionnelles d'irrigation qui représentent environ 90% des surfaces totales irriguées, de ce fait l'efficacité moyenne varie de 40 à 60%.
- La productivité (valorisation) du m³ d'eau d'irrigation est à peine moyenne. D'après le tableau 1, la culture de la tomate et les choux présentent une l'efficacité d'utilisation de l'eau la plus élevée dans la région.

Tableau 1 : Valorisation du m³ d'eau d'irrigation dans la plaine de la Mitidja.

Cultures	(t/ha)	Besoins (m ³ /h) Calcul Cropwat	Kg/m ³ (Algérie)	FAO	Ratio/FAO
Tomate	42	5000	8.6	12	0.70
Pastèque	30	4300	7	8	0.85
P. de terre	21	4200	5	7	0.70
Choux	13	1600	8.3	20	0.40
Raisin de T.	50	5000	1	4	0.25
Citrus	-	6200	-	5	-
Haricot vert	51	2600	2	2	1

Source : Mouhouche, 2008.

7. Impact de la gestion de l'eau en agriculture sur l'environnement

Les bassins côtiers oranais et celui du Chélif sont les plus affectés par les sels. La surexploitation des nappes phréatiques côtières se traduit de plus en plus par des intrusions salines irrémédiables (Oran, Alger, Jijel). La nappe du complexe terminal est très salée et celle du continental intercalaire très chaude. De même, les nitrates polluent la nappe de Mitidja dans ses parties est et ouest (objet de suivi de 1985 à 1993) (FAO, 2005). Des enquêtes dans le haut Chélif et dans la nappe de Sidi bel Abbès ont abouti à des conclusions analogues. L'eau du barrage de Keddara est particulièrement dure et il faut la mélanger par moitié avec de l'eau souterraine pour l'adoucir avant de la livrer. Enfin, les taux de manganèse et de chlorures dans l'eau d'alimentation de Constantine sont proches des maxima admis par l'Organisation mondiale de la santé.

8. Conclusion

L'Algérie, vaste territoire de la rive Sud de la Méditerranée, est aux prises avec la rareté de l'eau, problème qui se pose de plus en plus avec acuité, au vu du changement climatique et de la menace de la pollution (Mebarki, 2010).

Le développement de l'irrigation est sans conteste l'une des priorités majeures à long terme pour le secteur agricole en Algérie. Les objectifs de sécurité alimentaire et l'importance sociale de l'agriculture irriguée constituent des éléments fondamentaux de la politique agricole du pays et justifient les programmes nationaux visant l'extension des superficies irriguées et l'accroissement des volumes d'eau mobilisables, notamment par la construction de nouveaux barrages.

L'importation des produits agricoles gros consommateurs d'eau permet d'importer de l'eau virtuelle, définie par Allan en 1996 comme les volumes nécessaires à la production des biens importés et ainsi incorporée dans les échanges internationaux. Dans son analyse, ce concept décrit les opportunités du recours au commerce international pour satisfaire les besoins alimentaires des pays limités par les disponibilités hydriques.

L'analyse des flux d'eau virtuelle permet d'alimenter des réflexions sur les stratégies de gestion des ressources en eau ainsi que sur celles de la sécurité alimentaire et commerciale. (Fernandez et Verdier, 2004).

Pour mieux comprendre ce concept, nous allons présenter dans le chapitre qui suit une brève description du concept de l'eau virtuelle et ses composantes.

Chapitre III :

L'eau virtuelle

Chapitre III : L'eau virtuelle

1. Introduction

L'eau virtuelle est une métaphore d'abord utilisée par Allan (1993) pour illustrer comment, au Moyen-Orient en particulier, les fortes tensions sur les ressources en eau auxquelles les pays font face ont pu être endiguées en grande partie grâce à leurs échanges de produits agricoles avec le reste du monde, permettant un accès indirect, flexible et relativement peu coûteux à la disponibilité globale en eau.

A travers les échanges de biens ont ainsi lieu, virtuellement, des transferts d'eau des pays exportateurs vers les pays importateurs, puisque la production des produits échangés a nécessité, dans le pays exportateur, la consommation d'une certaine quantité d'eau.

Dans les pays du pourtour méditerranéen, les ressources en eau sont limitées et très inégalement réparties dans l'espace et dans le temps (Fernandez et Thivet, 2008).

Certains pays pauvres en eau sont devenus des importateurs nets d'eau virtuelle. Les céréales importées constituent une part importante de l'eau virtuelle consommée au Moyen-Orient et en Afrique du Nord, qui importaient déjà 50 millions de tonnes de céréales par an dès 2000 (UNESCO, 2012).

Suite au développement du concept dans un espace géographique limité, l'eau virtuelle a suscité l'intérêt de centres internationaux comme l'IHE de Delft (Institut de l'ingénierie hydraulique), l'IWMI (Institut international pour la gestion de l'eau) et d'organismes internationaux comme la FAO et le Conseil mondial de l'eau. Des efforts de recherche importants ont été consentis pour comptabiliser l'eau virtuelle et ses flux dans le monde. Ces travaux se sont non seulement attachés à quantifier ces transferts d'eau « silencieux », mais aussi à en évaluer les impacts sur la gestion des ressources en eau locales et globales (Fernandez, 2007).

2. Définitions

Le concept de l'eau virtuelle a été développé au milieu des années 80 par des économistes israéliens. Mais c'est au début des années 90 que le professeur Allan de l'université de King London a défini pour la première fois ce concept.

L'eau virtuelle se définit comme le volume d'eau nécessaire à la production d'un bien ou d'un service (Allan, 1993), ou l'eau utilisée dans le processus de production d'un bien économique (FAO, 2005).

Ces dernières années, le concept d'eau virtuelle a été étendu pour désigner l'eau qui est nécessaire à la production de produits agricoles ainsi que des produits industriels (Hoekstra et Hung, 2002). Dans le cas des produits agricoles, l'eau virtuelle est l'eau évapotranspirée par les cultures (Fernandez et Thivet, 2008).

D'après le Conseil mondial de l'eau, la quantité d'eau nécessaire pour produire divers types de nourriture varie considérablement selon le type de production :

Tableau 2 : Quantité d'eau par produit.

La production d'un kg de	Utilise un volume d'eau de
Lait	790 l
Blé	1 160 l
Riz	1 400 l
Bœuf	13 500 l

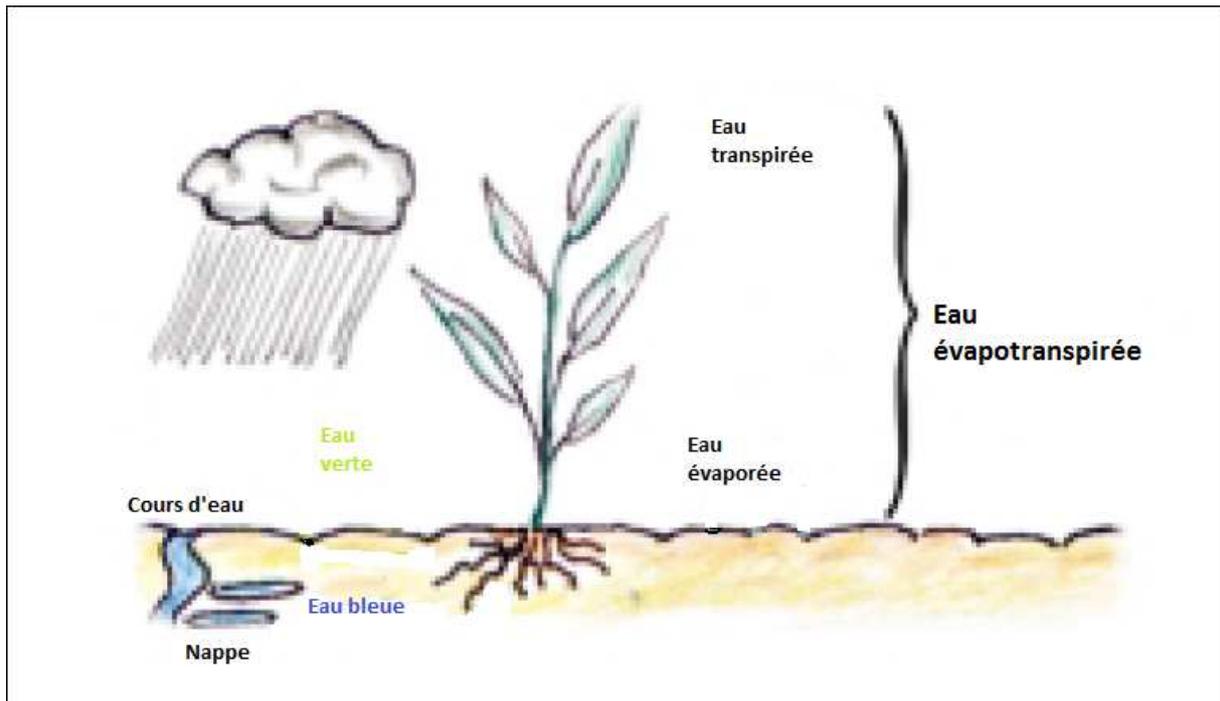
Source : Conseil mondial de l'eau, 2004.

Selon Renault (2003), il existe différentes méthodes envisageables pour le calcul de l'eau virtuelle contenue dans les produits agricoles, en insistant sur le fait que sa valeur dépend des conditions spatio-temporelles particulières.

Enfin, le concept d'eau virtuelle renvoie à celui de la productivité hydrique, qui peut selon que l'on se place dans une perspective d'analyse économique, agronomique, nutritionnelle prendre des unités différentes : m^3/kg produit, $m^3/\$$ généré, m^3/K calories et qui renvoie à des objectifs différents qui ne sont pas toujours compatibles (Fernandez, 2007).

3. Composantes de l'eau virtuelle

Deux composantes de l'eau virtuelle peuvent dans ce cas être distinguées : l'eau provenant des précipitations et présente naturellement dans le sol appelée « eau verte » et l'eau d'irrigation dérivée des eaux superficielles ou souterraines « eau bleue » (figure 3).



Source : Plan Bleu, 2008.

Figure 3 : Eau verte, eau bleue et eau évapotranspirée.

La part relative de l'une et de l'autre dans la consommation globale d'eau par les cultures peut varier considérablement. La mobilisation de l'eau bleue vise à s'affranchir de l'insuffisance et de la variabilité des précipitations et elle génère des coûts (financiers et économiques) bien plus élevés que l'utilisation de l'eau verte.

La mobilisation de l'eau bleue et de l'eau verte ne demande pas les mêmes conditions, ni les mêmes moyens et n'a pas nécessairement les mêmes impacts sur le milieu. La disponibilité de l'eau verte dépend des conditions climatiques, elle peut aussi être conditionnée par l'aménagement du territoire et l'occupation du sol à l'échelle du bassin versant considéré. L'eau bleue disponible dépend aussi de la pluviométrie mais pas aussi directement, en particulier parce qu'elle inclut l'eau souterraine dans les sources d'alimentation (Fernandez et Thivet, 2008).

Les cultures pluviales ne consomment que de l'eau verte, tandis que les cultures irriguées consomment à la fois de l'eau verte et de l'eau bleue. Pour quantifier l'eau consommée par une plante pendant sa croissance, Renault (2003) propose d'évaluer cette consommation à partir de l'évapotranspiration de l'eau (qui inclut l'eau verte et l'eau bleue)

Le contenu en eau virtuelle des produits végétaux a été déterminé par simulation des besoins en eau des cultures avec le modèle de bilan hydrique Cropwat de la FAO (2009), permettant de distinguer les apports d'eau bleue des apports d'eau verte.

On peut considérer que l'eau virtuelle contenue dans un produit est celle qui a été réellement consommée sur le lieu de production : c'est la sphère de la production. Elle peut permettre d'étudier par exemple les impacts des échanges d'eau virtuelle sur les ressources des pays exportateurs de produits agricoles.

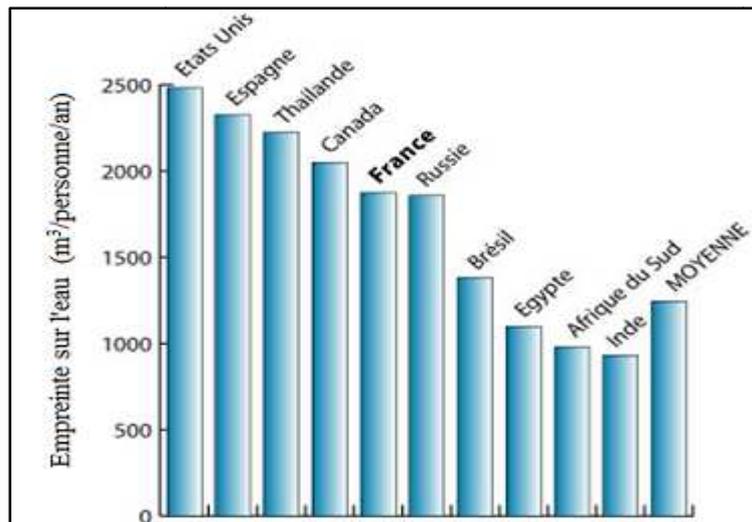
L'agriculture est l'activité qui prélève et consomme le plus d'eau avec des prélèvements qui représentent en moyenne 70 % sur de l'eau totale prélevée et une consommation qui représente plus de 90 % de l'eau totale consommée. A l'échelle méditerranéenne, elle représente 63% de la demande totale en eau (42% dans les pays du Nord et 81% dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée).

4. L'empreinte de l'eau

L'empreinte eau est un indicateur de l'usage direct ou indirect qui est fait de l'eau, par un consommateur ou un producteur. La méthodologie, mise au point en 2002 par Hoekstra, de l'UNESCO-IHE, et développée ensuite par l'Université de Twente (Pays-Bas), est décrite en détail dans le Water Footprint Manual : www.waterfootprint.org

L'empreinte hydrique est une mesure de la consommation d'eau qui peut être calculée pour une personne (Fig. 4), une entreprise, une ville ou un pays. Elle couvre la consommation directe (eau de boisson, nettoyage) et la consommation indirecte (production de biens et services). Cette dernière est appelée «eau virtuelle» (Gnehm, 2012).

A l'échelle mondiale, les 5 pays qui ont l'empreinte sur l'eau la plus élevée sont les États-Unis, l'Espagne, la Thaïlande, le Canada et la France (Figure 4).



Source : Chapagain et Hoekstra, 2004.

Figure 4 : Empreinte sur l'eau de quelques pays.

On peut définir trois facteurs majeurs qui déterminent l'empreinte sur l'eau d'un pays.

- le volume global de la consommation qui est directement relié à la richesse d'un pays. Cela explique en partie pourquoi des pays comme les Etats-Unis, l'Espagne ou la Suisse arrivent en tête,
- le mode de vie des habitants : une alimentation riche en viande augmente considérablement l'empreinte d'un pays. La consommation de biens industriels compte aussi pour une large partie dans le classement,
- le climat. Dans les pays chauds, l'évaporation et donc la consommation d'eau pour l'agriculture est particulièrement élevée. C'est pourquoi on trouve en bonne place des pays comme le Soudan (2 214 m³/personne/an), le Sénégal ou la Syrie. Ces pays pauvres, avec des conditions climatiques défavorables, ont de plus souvent des mauvaises pratiques agricoles coûteuses en eau (Deluzarche, 2005).

L'empreinte eau a trois composantes :

L'empreinte eau bleue : c'est la consommation des eaux de surface et des eaux souterraines ;

L'empreinte eau verte : c'est la consommation des eaux de pluie, notamment par évapotranspiration des cultures ;

L'empreinte eau grise : c'est le volume d'eau douce requis pour diluer les polluants dans des proportions suffisantes pour que la qualité de l'eau corresponde aux normes en vigueur.

« L'empreinte eau au sein d'un pays », ou « Empreinte eau de production nationale », correspond au volume total d'eau douce consommé ou pollué à l'intérieur du territoire du pays.

Elle se compose de :

- L'empreinte eau interne de consommation nationale, c'est-à-dire l'eau utilisée pour fabriquer les produits consommés par la population nationale.
- L'eau virtuelle exportée des produits fabriqués dans le pays, c'est-à-dire l'eau utilisée pour fabriquer sur le territoire des produits destinés à l'export.

« L'empreinte eau de consommation nationale » correspond à la quantité totale d'eau utilisée pour produire les biens et services consommés par les habitants d'un pays. Elle est constituée d'une composante interne et externe :

- « L'empreinte eau interne de consommation nationale »
- « L'empreinte eau externe de consommation nationale », c'est-à-dire l'eau utilisée par d'autres pays pour fabriquer les produits au sein des pays considérés, et consommés ensuite dans les pays importateurs.

« L'eau virtuelle de réexportation » correspond à l'eau utilisée pour fabriquer les produits importés qui sont ensuite réexportés.

Les données de l'empreinte eau de consommation et de production sont analysées au niveau national, régional, et des bassins versants. Elles sont aussi réparties selon les secteurs agricoles, industriels et domestiques. Le secteur agricole est par ailleurs analysé par type de cultures (Thouvenot, 2012).

4.1. L'intérêt d'estimation de l'empreinte sur l'eau

Une forte empreinte hydrique n'est pas une mauvaise chose en soi. Un produit nécessitant de grandes quantités d'eau mais provenant d'une région où l'eau est abondante ou qui gère intelligemment ses ressources ne pose pas problème. Il convient bien plus d'identifier les régions et les saisons correspondant à une empreinte hydrique préoccupante à long terme.

Les empreintes hydriques doivent retenir notre attention lorsqu'elles révèlent le tarissement ou la dégradation de fleuves, lacs et nappes aquifères en raison d'une utilisation non durable des ressources causant des préjudices environnementaux, économiques et sociaux (Gnehm, 2012).

5. Les flux d'eau virtuelle dans le monde

Le commerce de l'eau virtuelle a régulièrement augmenté au cours des quarante dernières années. Aujourd'hui, près du quart de l'eau utilisée dans le monde est exportée sous forme d'eau virtuelle (Fernandez et Verdier, 2004).

L'agriculture étant mondialement le premier secteur économique utilisateur d'eau, les échanges de produits agricoles constituent la principale composante du commerce de l'eau virtuelle. La répartition du commerce de l'eau virtuel par secteur d'après Hoekstra, à l'Institut UNESCO-IHE est comme suit:

- 67 % du commerce de l'eau virtuelle est lié au commerce international des cultures ;
- 23 % au commerce des animaux d'élevage et de leurs produits ;
- 10 % au commerce des produits industriels.

Entre 1995 et 1999, le blé représentait 30 % du volume total des échanges d'eau virtuelle des cultures entre les pays, le soja 17 % et le riz 15 %. Le commerce du boeuf est également important en termes de commerce mondial d'eau virtuelle.

A l'échelle mondiale, de 1995 à 1999, uniquement pour l'eau virtuelle des cultures, les cinq premiers pays exportateurs était, par ordre décroissant : les Etats-Unis d'Amérique ; le Canada ; la Thaïlande ; l'Argentine ; l'Inde (Fernandez, 2007).

5.1. L'importance de l'eau virtuelle dans la région méditerranéenne

Selon les résultats d'un travail de quantification réalisé sur différents pays méditerranéens, dans le cadre d'une étude du Plan Bleu par Fernandez (2007) qui a cherché à quantifier les flux d'eau virtuelle contenue dans les produits agricoles exportés et importés par l'ensemble des pays riverains de la Méditerranée. Les produits sélectionnés pour l'analyse étaient : le blé, l'orge, le maïs, les graines de soja, les olives, la viande de bœuf et quelques cultures spécifiques pour les différents pays (dattes pour l'Algérie par exemple). Ce sont tous des produits dont la part dans le flux total d'eau virtuelle liée au commerce agricole est supérieure à 1% et qui sont stratégiques du point de vue de la sécurité alimentaire.

Ils représentent environ 70% des échanges d'eau virtuelle issus de produits agricoles depuis et vers les pays méditerranéens.

Les importations ont été estimées en considérant les quantités d'eau qui auraient été nécessaires aux pays importateurs pour produire ce qu'ils ont importé.

Depuis 1990, la région méditerranéenne (tous les pays riverains confondus) est globalement importatrice nette d'eau virtuelle au travers des échanges commerciaux des produits retenus. Parmi les pays sélectionnés pour une analyse historique depuis 1990, seules la France et la Syrie (seulement entre 1993 et 1998 pour la Syrie) sont exportateurs nets d'eau virtuelle.

En moyenne, sur la période 2000-2004, seules la France et la Serbie-Monténégro sont exportatrices nettes d'eau virtuelle. Tous les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée sont importateurs nets d'eau virtuelle.

5.2. L'importance de l'eau virtuelle dans le monde arabe

Les pays du monde arabe sont de gros importateur d'eau virtuelle, en effet en 2001 ces importations étaient estimées à 75 milliards m³/an, dont plus de ¾ pour trois pays (Egypte, Arabie Saoudite et l'Algérie), soit une moyenne d'environ 700 l/hab/jour.

Quant aux exportations elles étaient estimées à environ 14 milliards de m³ et ne concerne que trois pays (Tunisie, Soudan et Mauritanie) (Mouhouche et Lani, 2010).

Tableau 3 : Volume d'eau virtuelle dans le monde arabe.

Pays	Eau virtuelle millions de m ³	Pays	Eau virtuelle millions de m ³
Algérie	12 397	Lybie	3 237
Arabie Saoudite	13 863	Maroc	2 419
Bahrein	860	Mauritanie	-2
Egypte	18 171	Qatar	425
Emirats Arabes Unies	3 362	Somalie	572
Irak	2 180	Soudan	-6 969
Jordanie	3 467	Syrie	1 014
Tunisie	-6 900		

Source : Mouhouche et Lani, 2010.

L'évaluation du contenu de l'eau des importations agricoles selon l'origine des importations informe sur les volumes d'eau virtuelle effectivement échangés et se prête bien aux comparaisons internationales.

5.3. L'importance de l'eau virtuelle des céréales en Algérie

Selon Lani (2011), la quantité d'eau virtuelle dans les céréales est la somme des quantités de l'eau verte et de l'eau bleu, les résultats obtenus sur ses deux composantes, donc la quantité de l'eau virtuelle contenue dans les céréales produites en Algérie est de 5 734 253 680 m³ pour une superficie 1 732 283 ha.

Il ya lieu de signaler que ce volume reste un volume moyen des 9 dernières années (1998-2006) donc la production d'un kg de céréale conduite en pluviale nécessite un volume d'eau de 3,3 m³. Ce volume est calculé sur la base des quantités d'eau de pluie totales évaluées à 6 261 962 351 m³.

Les chiffres relatifs à la surface et à la production permettent de déterminer le niveau de valorisation de l'eau verte, qui s'exprime par le concept de l'efficience d'utilisation de l'eau totale de pluie et de la pluie efficace.

Il n'est que 3 m³ pour la production d'un kg de céréale, si l'on ne comptabilise que la pluie efficace. Le volume d'eau de pluie sur une parcelle de céréale d'un hectare produisant 1100 kg de céréales est de 3 630 m³/ha (Lani, 2011).

6. L'intérêt du concept de l'eau virtuelle

La quantification de l'eau virtuelle d'un produit permet de montrer que chaque mode de consommation nécessite une quantité d'eau spécifique. La consommation de bœuf exige environ dix fois plus d'eau que la consommation d'un poids équivalent de blé. Il est évident qu'à poids égal, deux aliments ne procurent pas le même apport nutritionnel. En ce sens, le principe d'équivalence nutritionnelle est fort utile. Selon ce principe, avec 1 m³ d'eau utilisé pour produire des pommes de terre, on obtient un apport énergétique équivalent à une quantité de blé dont la culture aurait nécessité 2.5 m³ d'eau (Renault, 2003). L'intérêt porté au concept d'eau virtuelle a permis d'ouvrir le débat sur les interactions entre commerce agricole international, gestion des ressources en eau (au niveau local et global) et sécurité alimentaire.

La vision libérale de ce concept met en avant les gains potentiels des transferts d'eau virtuelle en termes d'efficience de la mobilisation, de la répartition et de l'utilisation des

ressources en eau. On peut en effet se demander si la valeur de l'eau utilisée pour produire certaines denrées alimentaires de première nécessité (telles que le blé ou le riz), dans des pays affectés par des pénuries d'eau, ne finit pas par être supérieure à la valeur des produits. En important ces biens, dont les prix sur les marchés mondiaux sont bas, les pays affectés par des pénuries d'eau peuvent réduire les tensions exercées sur leurs propres ressources en eau et/ou permettre de les mobiliser pour des usages qui la valorisent mieux.

Avec le concept d'eau virtuelle, il est donc possible d'expliquer comment le système économique international permet à des pays de réagir à une situation de rareté de l'eau en important des produits agricoles. Il met en évidence le rôle peu visible du commerce international dans les politiques de gestion de l'eau, particulièrement au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. Ainsi, Israël importe 13 fois plus de céréales qu'elle n'en produit, la Lybie 10 fois plus, l'Algérie 2 fois plus et l'Égypte et le Maroc en importent 0,6 fois plus (Yang et Zehnder, 2002).

Sur le plan économique, on considère que le commerce de l'eau virtuelle constitue un moyen d'approvisionnement en eau moins dispendieux que l'extraction de l'eau à partir d'aquifères profonds ou de systèmes d'irrigation moins exigeants en eau (Parveen et Faisal, 2004).

Les économies d'eau qui peuvent résulter des échanges d'eau virtuelle se font non seulement au sein des pays importateurs, mais aussi au niveau mondial, étant données les différences de productivité entre pays exportateurs et pays importateurs. Oki (2004), *in* Fernandez, (2007) estime ainsi les économies d'eau résultant des échanges d'eau virtuelle au niveau global à environ 400 km³ d'eau en 2000, dont 180 km³ d'eau « bleue », ce qui représente respectivement environ 3,9% 14 et 1,7% des ressources mondiales d'eau aisément accessibles estimées à 10 300 km³.

La vision environnementale associée à la notion d'empreinte sur l'eau d'un pays, d'un individu met en lumière l'impact sur les ressources en eau de certaines logiques productives et certains modes de consommation, qui s'exerce à l'échelle mondiale, via les échanges de produits agricoles. Les importations permettent de relâcher les pressions sur les ressources des pays, mais les transferts d'eau virtuelle ont aussi des impacts importants sur les ressources des pays exportateurs. Même lorsque ces pays disposent de ressources globalement abondantes, ces transferts se traduisent par des tensions entre usagers ou des dégradations environnementales.

7. Conclusion

La mobilisation du concept d'eau virtuelle se heurte à des limites multiples, liées au contexte dans lequel il intervient et à sa vocation analytique ou prescriptive. Il est particulièrement important de souligner que les échanges d'eau virtuelle constatés ne sont pas, dans la grande majorité des cas, le résultat de choix conscients dans une optique d'optimisation de l'utilisation des ressources en eau. Ils sont plutôt le résultat d'échanges commerciaux influencés par des politiques définies à partir de multiples considérations.

Le concept d'eau virtuelle et ses apports sont par conséquent à envisager principalement de façon analytique, à la lumière de situations particulières (environnementales, économiques, sociales, politiques, culturelles). Il est à considérer comme un outil pour éclairer le débat.

Finalement, le concept d'eau virtuelle s'avère être un outil d'analyse intéressant dans la mesure où il éclaire des phénomènes et incite à la réflexion, mais sa valeur prescriptive reste encore à démontrer. Les flux d'eau virtuelle et leurs impacts doivent être analysés dans les contextes particuliers de chaque pays, à des échelles adaptées.

Deuxième partie :

Matériel et méthode

Chapitre IV :

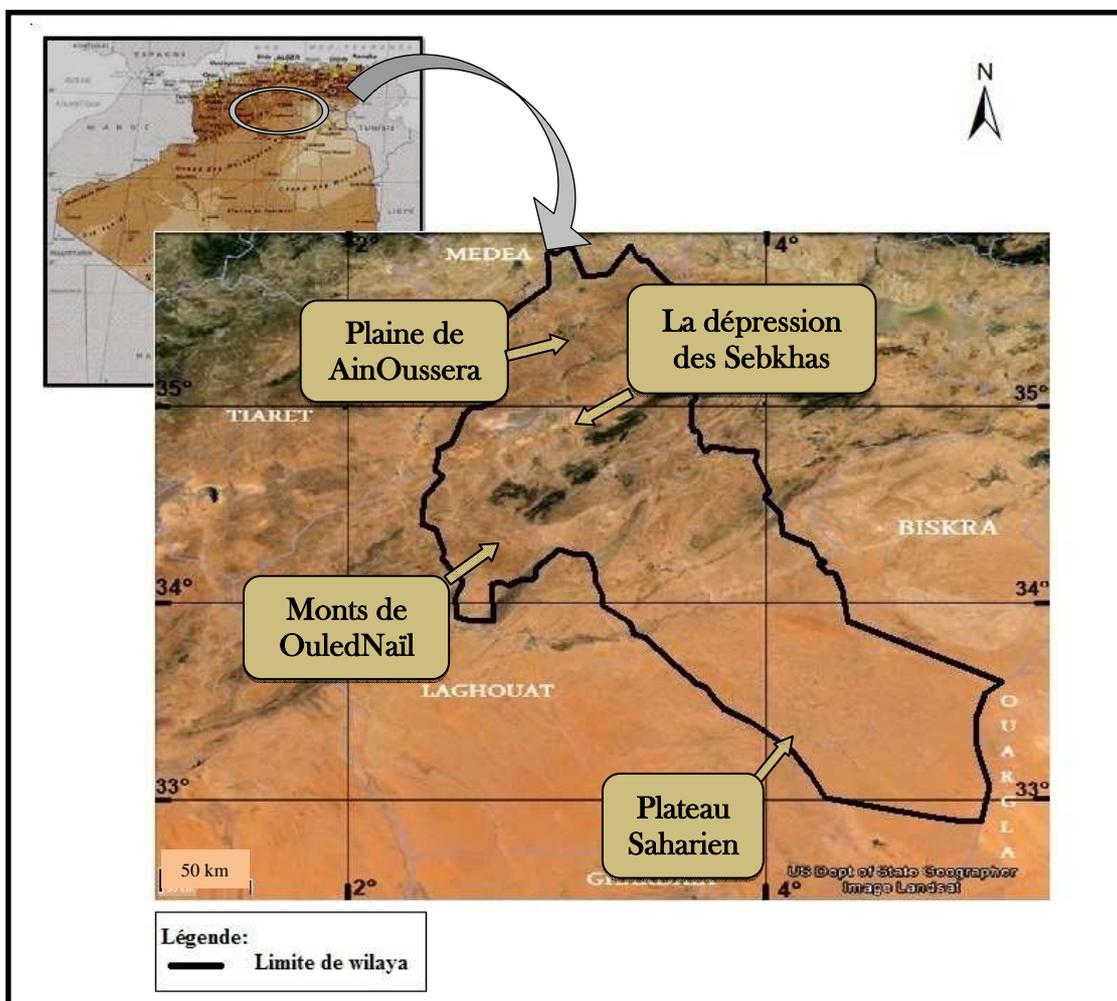
Présentation de la zone d'étude

Chapitre IV : Présentation de la zone d'étude

1. Situation géographique de la wilaya

La wilaya de Djelfa est située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord au delà des piémonts Sud de l'Atlas Tellien en venant du Nord dont le chef lieu de wilaya est à 300 kilomètres au Sud de la capitale. Elle est comprise entre 2° et 5° de longitude Est et entre 33° et 35° de latitude Nord, avec une superficie totale de 32.256,35 km² représentant 1,36% de la superficie totale du pays. Elle se compose actuellement de 36 communes regroupées en 12 Dairate. Elle est limitée (figure 5) :

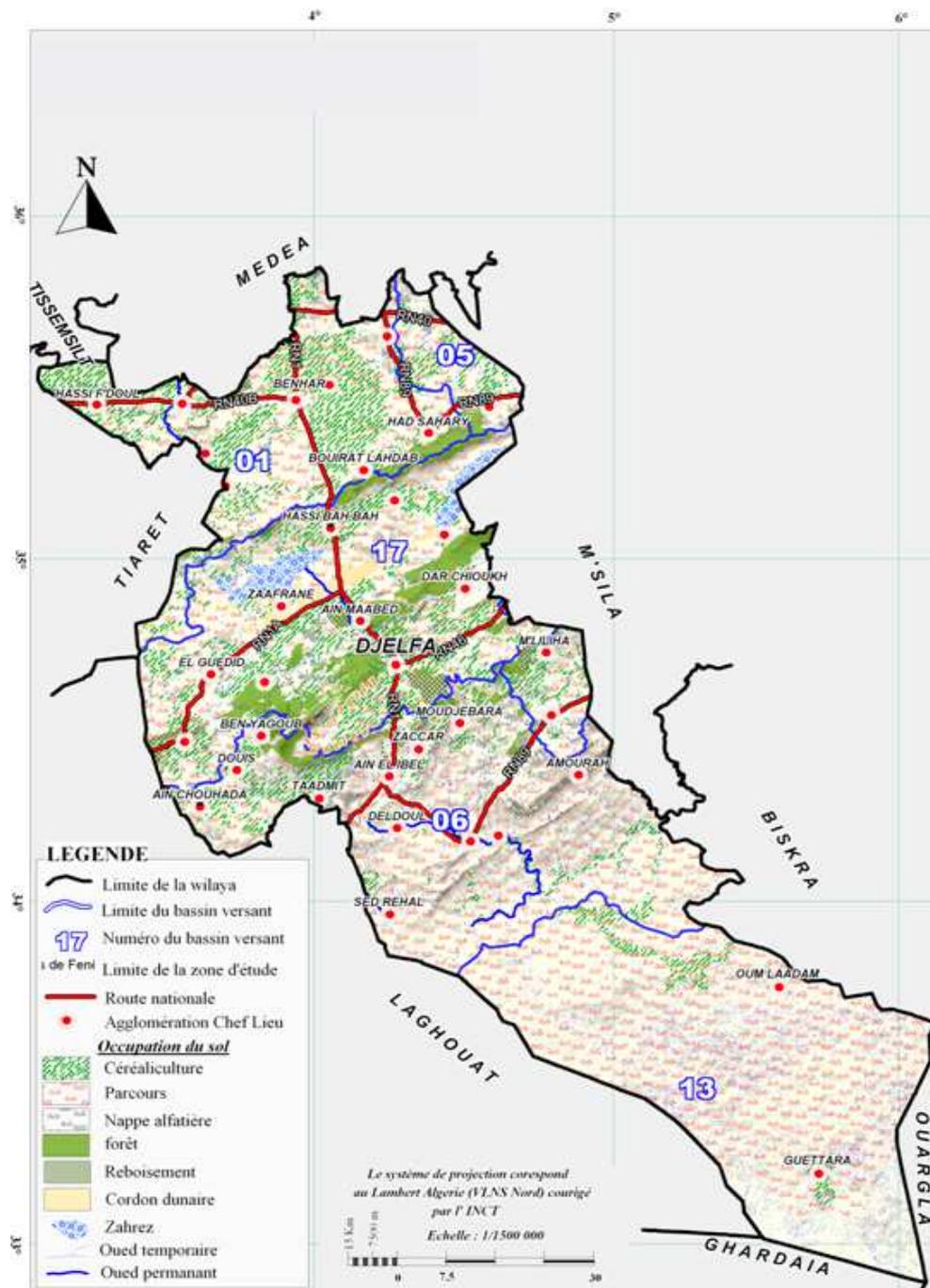
- Au Nord par les wilayate de Médéa et de Tissemsilt ,
- A l'Est par les wilayate de M'Sila et Biskra,
- A l'Ouest par les wilayate de Laghouat et de Tiaret,
- Au Sud par les wilayate de Ouargla et de Ghardaïa (Figure 6).



Source : Google earth, 2010. Modifié

Figure 5 : Situation géographique de la wilaya de Djelfa.

La wilaya de Djelfa est région agro-pastorale où les parcours occupent plus de 65 % de sa surface totale (Figure 6). Le couvert végétal naturel de la région est constitué essentiellement de hautes steppes arides. Le milieu steppique est ainsi très fragile et donc soumis à une dégradation facile.



Source : CDFD, 2007.

Figure 6 : Occupation des sols de la wilaya de Djelfa.

2. Relief

Le relief de la wilaya de Djelfa est caractérisé par la succession de quatre (04) zones non homogènes du Nord au Sud de son territoire. Les quatre zones non homogènes sont :

- Zone plaine du Nord: d'une superficie de l'ordre de 500.000 ha, cette zone est aussi appelée "Plaine de Ain Oussera". Elle est comprise entre 650 et 850 m d'altitude.
- Zone des dépressions des chotts: Cette zone est aussi appelée "la dépression des Sebkhass" Elle se situe à des altitudes allant de 750 à 850 m.
- Zone de la dépression des monts de Ouled Naïl: Cette zone est formée de petites plaines dont l'altitude varie entre 900 et 1.600 m. La partie élevée de la dépression constitue la chaîne montagneuse des Ouled Naïl.
- Zone du plateau pré désertique: Cette zone est aussi appelée "Plateau Saharien" dans la partie Sud de la Wilaya. Elle plonge dans la dépression formée par l'Oued Djeddi considéré comme la limite naturelle du Sahara (IDOM IV, 2005).

3. Les sols

D'une manière générale, les sols sont pauvres et squelettiques car la caractéristique steppique de la région n'offre pas les meilleures possibilités pour la constitution de sols épais favorables au développement de l'agriculture.

Sur les montagnes et les reliefs élevés, les sols sont très pauvres en contact direct avec la roche mère. Dans les zones des plaines et des plateaux, les sols sont constitués d'alluvions d'épandage. Dans la partie Sud de la Wilaya, formant le plateau pré désertique, les sols sont dénudés par l'action de l'érosion et des vents très puissants contribuant ainsi à la dégradation du milieu naturel (DPAT, 2010).

4. La végétation

Les types de végétation se déploient depuis les hauts plateaux du Sud algérois au Sud de la wilaya dominés par les steppes désertiques (Les steppes à Alfa, et Armoise blanche, steppes à Sparte, à psammophytes, à halophytes et les steppes désertiques). (IDOM VI, 2005).

La superficie totale des forêts dans la Wilaya de Djelfa est estimée à environ 214.117,4078 ha, ce qui représente 6,63% de la superficie totale (Figure 6).

Les forêts occupent les chaînes de montagnes du Sénalba, du Djebel Azreg et du Djebel Boukahil. Les forêts sont claires et aérées par manque de sous bois conséquent et

l'inexistence de maquis. Les principales essences forestières sont le pin d'Alep, le chêne vert et le genévrier du Phénicie (arar). Les pacages et parcours couvrent aussi une superficie très importante de l'ordre de 2.138.100 ha représentant 66,28% de la superficie totale (DPAT, 2010).

La céréaliculture pluviale est constituée essentiellement de blé et d'orge en zone sub-aride. Les cultures irriguées sont le maraîchage, les arbres fruitiers et certaines céréales. Les cultures par épandage de crues sont très importantes (IDOM V, 2005).

5. Hydrologie

Le réseau hydrographique dans cette région est très dense avec des ramifications à travers l'ensemble des reliefs. La direction des principaux oueds est souvent différente de celle des reliefs, elle leur est fréquemment perpendiculaire Nord-Sud à Nord-Ouest-Sud-Est (à l'exemple des Oueds M'zi, Messad, El Djorf, etc.). Il arrive cependant qu'elle soit conforme à ces reliefs comme les vallées affluentes développées à l'intérieur des dépressions résultant de l'inversion des reliefs tels est le cas des combes des Djebels Lazreg et de Tebag au Sud- Ouest de Fernane et des synclinaux perchés de Bou Kahil de Djebel Zerga et de Djelfa. Par ailleurs, la plupart des oueds dans cette région, aride à sub-aride, ne coulent que lorsqu'il pleut à l'exception faite de quelques écoulements pérennes liés à des sources importantes (ANAT, 2003).

6. Hydrogéologie

La wilaya de Djelfa est caractérisée par quatre nappes principales : La plaine de Ain Oussera, les nappes de Zahrez, le synclinal Nord de Djelfa et le synclinal Sud de Ain El lbel, et chaque nappe a des caractéristiques spéciales.

7. Le climat

Le climat de la Wilaya de Djelfa est nettement semi-aride à aride avec une nuance continentale. En effet, le climat est semi-aride dans les zones situées dans les parties du centre et du Nord de la Wilaya et aride dans toute la zone située dans la partie Sud de la Wilaya. (DPAT, 2010). Le climat semi aride se traduit par des étés chauds et des hivers froids.

Les informations concernant les données climatiques sont recueillies auprès de l'Office National de la Météorologie de la wilaya de Djelfa. Les données couvrent la période de 1975 à 2009.

7.1. Précipitations

Les précipitations constituent un facteur écologique d'importance fondamentale pour la répartition des groupements végétaux ainsi que leur fonctionnement.

D'une manière générale, la pluviométrie est marquée par une grande irrégularité d'une année à une autre. Les pluies sont souvent sous forme d'orages. La moyenne interannuelle est de 327 mm. On observe un maximum qui dépasse les 500 mm et minimum inférieur à 200 mm (Figure 7).

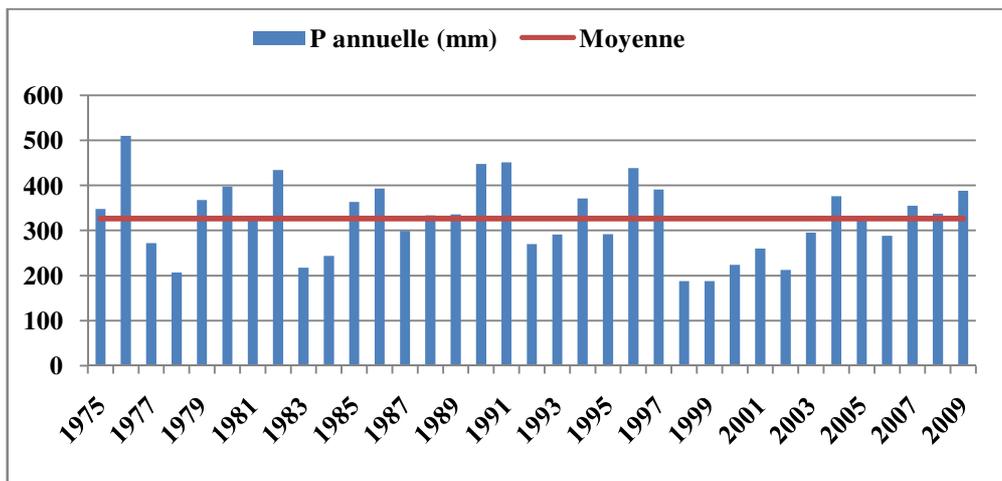


Figure 7 : Evolution de la pluviométrie annuelle (1975-2009).

La pluviométrie mensuelle moyenne enregistrée est reportée sur la figure 8, qui montre que les précipitations maximales correspondent, principalement aux mois de janvier, mai et septembre avec un maximum pour le mois de Janvier de 35,7 mm, alors que le mois le plus sec correspond à juillet avec 11 mm, les autres mois ont des moyennes convergentes sauf le mois de juin et août.

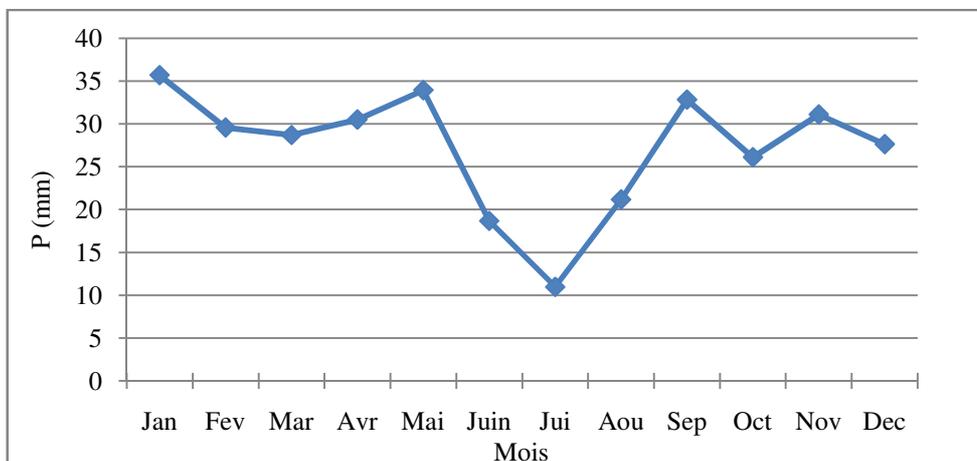


Figure 8 : Pluviométries mensuelles moyennes interannuelles (1975-2009).

7.2. Températures

La température de l'air a une action sur les cultures, quantitativement par la somme d'énergie en relation avec la croissance du végétal, qualitativement par le seuil de température (maximale et minimale) et sur la quantité d'eau évaporée.

La figure 9 montre l'évolution des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes. On remarque que la période chaude s'étale de mai à octobre, la température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois de juillet 26,3°C, quant à la période froide, elle s'étale sur une durée moyenne de quatre mois à partir de novembre jusqu'au mois de mars. La température moyenne mensuelle la plus basse est celle du mois de janvier 4,6°C.

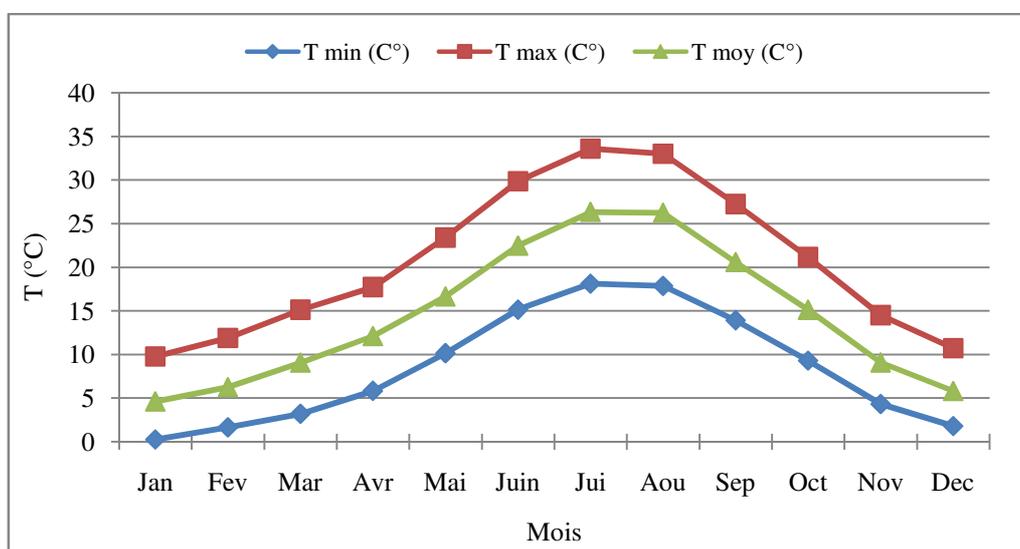


Figure 9 : Evolution des températures mensuelles minimales, maximales et moyennes (1975-2009).

7.3. Les gelées

L'action des gelées peut entraîner le flétrissement des plantes. Elles jouent un rôle négatif sur la structure et l'activité des plantes de la région.

Les gelées caractérisent la période qui s'étale du mois de novembre au mois de mars, elles sont provoquées par les baisses extrêmes de températures (tableau 4).

Tableau 4 : Nombre de jours mensuels de gelée (1990-2009).

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Nbr. de jour de gelée	12	10	4	1	0	0	0	0	0	0	5	10

Source : ONM Djelfa.

7.4. Diagramme ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique de GausSEN permet de déterminer la durée de la période sèche durant l'année. Cette période est matérialisée par l'intersection des deux courbes de température et de précipitation.

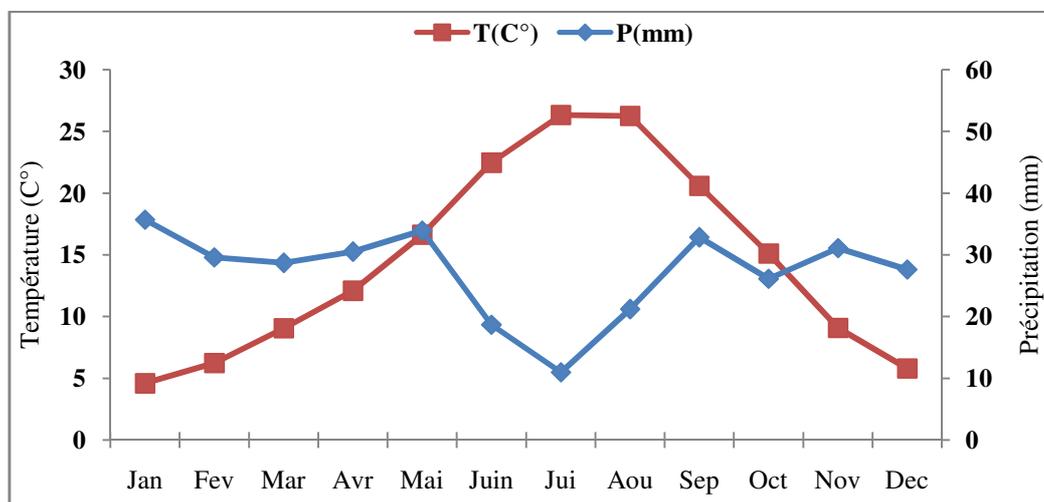


Figure 10 : Diagramme ombrothermique moyen (1975-2009).

D'après la figure 10, la zone d'étude est caractérisée par une période humide qui s'étale depuis mi-octobre jusqu'à mi Mai. Cependant la période sèche durant laquelle les précipitations sont rares et faibles et les températures sont élevées, qui dure 5 mois s'étale de la mi-mai à la mi-octobre.

7.5 Quotient pluviométrique et climagramme d'Emberger

Le climagramme d'Emberger (1955) permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée en calculant le coefficient pluviométrique, par la formule suivante :

$$Q = 3.43 P / (M - m)$$

Où :

Q : quotient pluviométrique

P : précipitation moyennes annuelles (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (°C).

m : moyenne des minima du mois le plus froid (°C).

Après application de la formule, nous obtenons la valeur de Q égale à 33,6 (avec $m = 0,26$ °C), cette dernière situe la zone d'étude dans l'étage semi-aride à hiver frais (figure 11).

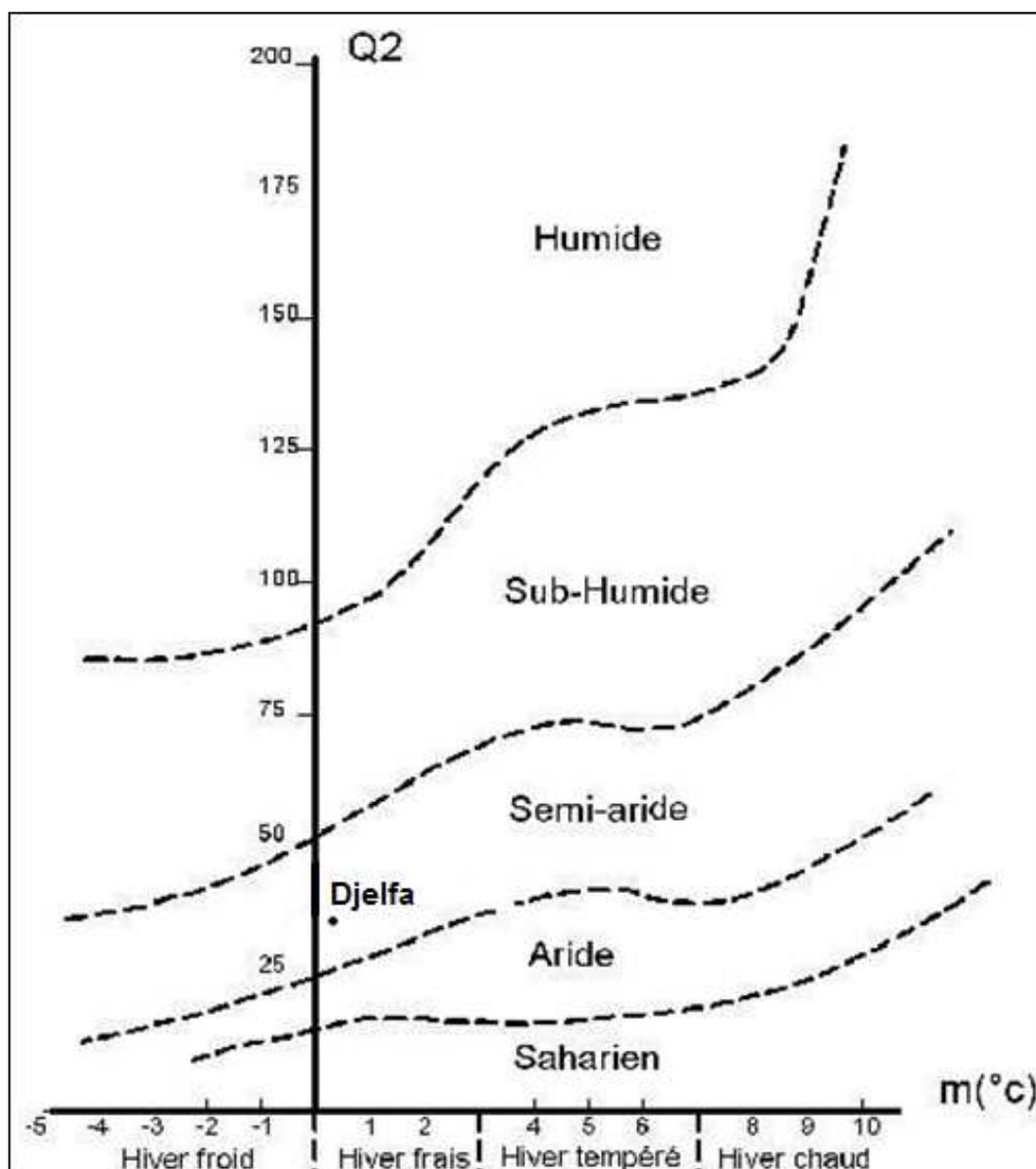


Figure 11 : Climagramme d'Emberger.

8. Potentialités en eaux reconnues

Les potentialités en eau totale (superficielles et souterraines) reconnues dans la région de Djelfa sont estimées à 150 Hm³/an (ANAT, 2003).

En tenant compte de la classification du réseau d'agglomération de la région de Djelfa et des données relatives à l'estimation de la population, les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable ont été évalués sur la base des dotations en eau suivantes :

Tableau 5: Besoins en eau pour l'alimentation en eau potable.

Réseau d'agglomération	Dotations en eau
Agglomération chef-lieu de wilaya	180 l/j/hab.
Agglomération urbaine	150 l/j/hab.
Agglomération semi urbaine	120 l/j/hab.
Agglomération rurale	100 l/j/hab.

Source : ANRH Djelfa.

9. Répartition générale des terres agricoles

La répartition des terres durant la campagne agricole 2011-2012 dans la wilaya est donnée par le tableau 6 :

Tableau 6: Répartition générale des terres (ha).

SAT	SAU	Foret	Alfa	Parcours	Inculte	Superficie Totale
2 501 093	378 665	208 940	350 798	2 122 428	164 804	3 225 635

Source : DSA Djelfa.

La surface agricole utile (SAU) représente 11,7% de la superficie totale de la wilaya soit 378 665 ha.

9.1. Les superficies irriguées

Les superficies irriguées représentent environ 8% de la SAU, dont 44 % irriguées par le système goutte à goutte (Figure 12). Le tableau 7 synthétise la répartition des surfaces irriguées selon leur vocation.

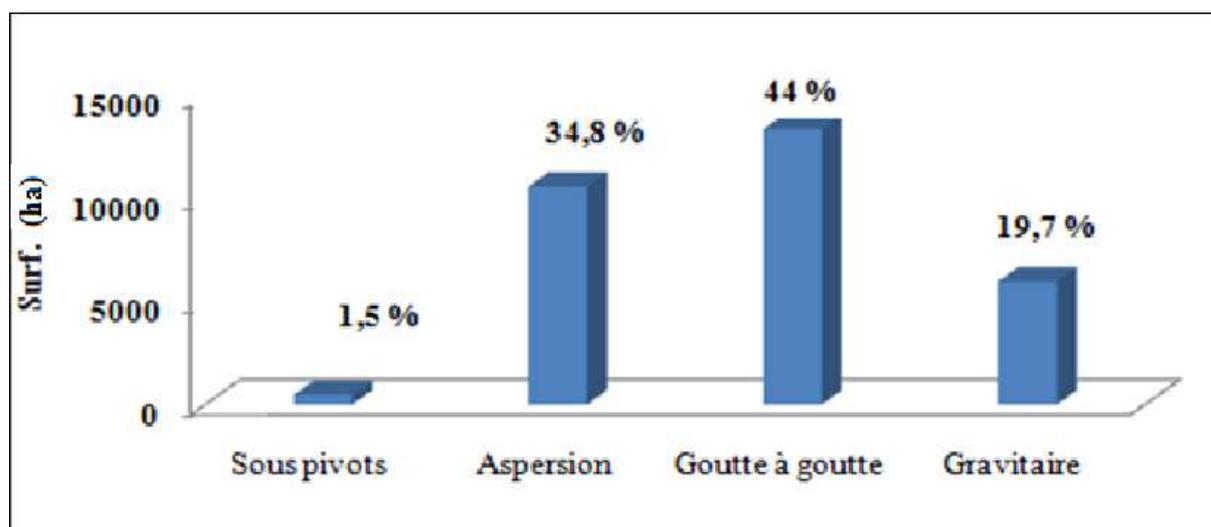
Tableau 7: Répartition de la superficie irriguée par type de culture (ha) (2011-2012).

Cultures herbacées			Arboricultures fruitière	Total irrigué
Maraîchage	Cultures fourragères	Céréales		
7 120	3 331	3 790	16 069	30 310

Source : DSA Djelfa.

9.2. Type d'irrigation

Les surfaces cultivées par type d'irrigation sont présentées dans la figure 12. Sur la campagne agricole 2011- 2012, la superficie totale irriguée est de l'ordre de 30 310 ha dans l'ensemble de la wilaya.



Source : DSA Djelfa.

Figure 12 : Superficies irriguées par système d'irrigation de la campagne (2011-2012).

Nous constatons que les systèmes dits modernes économiseurs d'eau prédominent dans la wilaya, ce qui est à encourager.

10. Conclusion

La wilaya de Djelfa se caractérise par une activité agro-pastorale, où l'élevage ovin occupe une place prépondérante.

Le couvert végétal surexploité et fortement dégradé du fait de la pression du pâturage et n'offre pas de perspective de développement des élevages extensifs, sauf si une gestion raisonnée des parcours est appliquée.

La wilaya ne compte aucun barrage et les seules ressources en eau sont constituées par les eaux souterraines dont les réserves exploitables sont estimées à près de 92 Hm³ dont une bonne partie est la nappe de la région de Djelfa, tandis que les écoulements de surface et retenues diverses représentent 21 Hm³. La surexploitation des ressources souterraines est avérée (PNE, 2011).

Chapitre V :

Présentation du logiciel Cropwat 8.0

Chapitre V : présentation du logiciel Cropwat 8.0

L'estimation de la quantité d'eau virtuelle agricole dans la wilaya de Djelfa est basée sur la détermination des besoins en eau des cultures qui est calculée par le biais du logiciel Cropwat.

1. Logiciel Cropwat

Le Cropwat est un logiciel d'aide à la gestion de l'irrigation, il a été mis au point par la FAO en 1992, basé sur la formule de Penman – Monteith modifiée. Il permet le calcul des besoins en eau des cultures et des quantités d'eau d'irrigation ; basés sur les Bulletins d'irrigation et de drainage FAO-24 et 33. Il offre également la possibilité de développer un calendrier d'irrigation en fonction de diverses pratiques culturales, et d'évaluer les effets du manque d'eau sur les cultures et l'efficacité des différentes pratiques d'irrigation.

Le principal avantage de ce logiciel est d'éviter la manipulation de nombreuses formules souvent lourdes à utiliser.

2. Les données utilisées par le logiciel Cropwat dans le calcul des besoins

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région.

- Les données climatiques donneront les indications nécessaires concernant les besoins en eau de la culture (demande climatique) ;
- Les données pédologiques permettront d'estimer la réserve en eau du sol ainsi que le tarissement initial de l'eau du sol ;
- Les données culturales préciseront la réserve en eau facilement utilisable par la plante (Van Laere, 2003), ainsi que le coefficient cultural.

L'objectif principal de ce logiciel est de calculer les besoins en eau des cultures et d'établir des calendriers d'irrigation basés sur des données fournies par l'utilisateur. Ces données peuvent être entrées directement dans Cropwat ou importées depuis d'autres applications.

2.1. Les données climatiques

Le logiciel Cropwat exige 5 données climatiques d'une station météorologique normalisée, pour que cette dernière soit représentative elle doit être la plus proche de la zone

agricole, les stations comme celle des aéroports ou dans les zones urbaines sont à éliminer (Doorenbos et Kassam 1979).

En cas où la station la plus représentative ne donne pas les 5 données climatiques, il est conseillé de les estimer. La FAO propose les méthodes d'estimation de l'humidité relative, du rayonnement, et la vitesse du vent dans son Bulletin-56.

La station que nous avons considérée est celle située au chef lieu de la wilaya. C'est une station normalisée qui donne les 5 données (précipitation, température, humidité relative, vitesse du vent et durée d'insolation). Les relevés sont récents et s'étalent sur une période d'observation acceptable (de 1975 à 2009). Les coordonnées géographiques de la station sont:

- **Latitude** : 34,20 N
- **Longitude** : 03,23 E
- **Altitude** : 1180,5 m

On introduit les températures moyennes maximales et minimales (°C), l'humidité relative de l'air (%), la vitesse du vent (km/jour ou en m/s) et l'insolation (heures). Les données introduites de chaque paramètre sont mensuelles.

L'ensemble de données climatiques entrées dans le logiciel Cropwat sont montrées dans le tableau 8 :

Tableau 8 : Les 5 données climatiques entrées dans le Cropwat.

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T Min (C°)	0,26	1,63	3,20	5,83	10,14	15,13	18,11	17,85	13,91	9,29	4,31	1,79
T Max (C°)	9,76	11,88	15,12	17,72	23,40	29,85	33,60	33,01	27,25	21,16	14,49	10,71
H (%)	75,63	69,71	63,49	58,23	53,09	43,26	36,25	38,63	52,17	62,14	71,11	76,31
Vent (km/jour)	311	313	336	370	334	293	265	244	234	255	280	329
Inso. (heures)	6,44	6,62	8,14	8,58	9,82	10,28	10,51	10,14	8,22	7,96	6,46	5,81
P (mm)	35,68	29,58	28,69	30,50	33,92	18,68	10,98	21,18	32,82	26,11	31,09	27,63

Source : ONM Djelfa.

2.2. Les données liées au sol

Les données du sol sont nécessaires dans le pilotage des irrigations pour la détermination de la réserve utile (RU) qui est liée à la texture et la profondeur d'enracinement.

D'après la FAO, les valeurs de RU selon les différentes textures de sol considérées généralement sont :

- sol grossier : 60 mm/m,
- sol sableux : 100 mm/m,
- sol limoneux : 140 mm/m,
- sol argileux : 180 mm/m.

Les profondeurs d'enracinement à prendre en compte pour les calculs des besoins en eau sont comme suit (Tableau 9).

Tableau 9: Les profondeurs d'enracinement des principales cultures.

Cultures	Profondeur d'enracinement (m)
Cultures maraîchères	0,3 à 0,6
Arbres fruitiers	1,4
Céréales	0,3 à 1,4
Cultures fourragères	1,2

Source : Ollier et Poirée, 1983 ; FAO bulletin 56.

Vu la diversité des différents types de sols de la wilaya de Djelfa, nous avons opté dans le cas de notre étude pour un sol moyen ayant les caractéristiques suivantes :

Tableau 10 : Les données liées au sol proposées dans le Cropwat FAO (2009).

Eau utilisable	140 mm/m
Taux maximum d'infiltration de pluie	40 mm/jour
Profondeur racinaire max d'enracinement	0,6 ou 1,2 m
Tarissement initial de l'humidité de sol (% de d'eau utilisable)	100%
Humidité initiale disponible du sol	0 mm/m

2.3. Les données liées à la culture

Pour recenser les cultures pratiquées généralement dans la wilaya de Djelfa, nous avons eu recours aux rapports de la DSA de Djelfa.

Nous avons calculé la moyenne des surfaces cultivées (28 cultures) sur la période de 1998 à 2012, à l'exception des céréales qui est sur la période de 2009 à 2012.

Les cultures similaires ont été mises en groupe de cultures ayant des valeurs semblables pour les paramètres culturaux.

D'autre part, les cultures occupant une superficie de moindre importance ont été soit supprimées ou ajoutées à d'autres cultures du même groupe beaucoup plus représentatif (Tableau 11).

Tableau 11: Répartition des surfaces cultivées dans la wilaya de Djelfa.

Culture	Groupe	Surf. (ha)	% de surf. Cultivée
Blé	Blé	7400	13,2
Orge	Orge	29977	53,4
Avoine			
Fourrages	Fourrages	3331	5,9
Olivier	Olivier	3384	6,0
Poirier	Espèces à pépins	3302,6	5,9
Pommier			
Cognassier			
Abricotier	Espèces à noyaux	2538	4,5
Pêcher			
Prunier			
Amandier			
Pistachier	Autres arbres	1038,5	1,9
Grenadier			
Figuier			
Vigne			
Pomme de terre	Pomme de terre	1261	2,2
Carottes	Carottes	636	1,1
Tomates	Tomates	225,6	0,4
Ail, oignon	Oignons	1388	2,5
Piments, poivrons	Poivrons	224	0,4
Melon, pastèque	Melon	362,6	0,6
Concombres, courgettes	Courgettes	288	0,5
Navets	Navets	232	0,4
Laitue	Laitue	274	0,5
Choux	Autre cultures maraîchères.	253,9	0,5
Aubergine			
Fèves, Haricots			
Total	Total	56 119	100

Source : DSA Djelfa.

2.3.1. Date de semis, de plantation ou de reverdissement

Nous avons adapté les dates de semis (ou de plantation) régionales, pour cela nous avons eu recours à des entretiens avec les agriculteurs et les techniciens afin d'avoir les informations locales.

2.3.2. Les phases de développement

Les 4 phases de développement considérées sont :

- la phase initiale,
- la phase de développement,
- la phase de mi-saison,
- la phase d'arrière saison.

Il est difficile de déterminer avec précision la durée de chaque phase. Le seul moyen d'avoir les informations locales est le contact direct avec les agriculteurs et les agents de vulgarisation ou bien les bulletins de la FAO d'irrigation et de drainage.

Concernant les arbres fruitiers (cultures pérennes), d'après Tuzet et Perrier (1998), leurs dates de plantation doivent être remplacées par la date du reverdissement, c'est-à-dire la date d'apparition de nouvelles feuilles.

2.3.3. Le coefficient cultural (kc)

Par définition, le coefficient cultural (kc) est le rapport entre l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et l'évapotranspiration potentielle (ET_0), il intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence qui sont : la hauteur de la culture, la résistance de surface sol - végétation, l'albédo, l'évaporation de sol (Allen et al, 1998).

Les facteurs qui influent sur la valeur de kc sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif, les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations.

Cropwat exige l'entrée de 3 valeurs de kc (initiale, mi-saison, récolte), nous avons utilisé les kc des Bulletins de FAO-24 et 56, qui sont des kc standards et valides pour l'utilisation de la formule de Penman – Monteith.

Les valeurs de k_c du Bulletin FAO-56 ont été actualisées par Allen et al (1998) sur la base des k_c proposés par Doorenbos et Pruitt dans le Bulletin FAO-24 (1975).

La figure 13 montre un exemple d'introduction des principales caractéristiques liée à la culture (exemple de l'olivier).

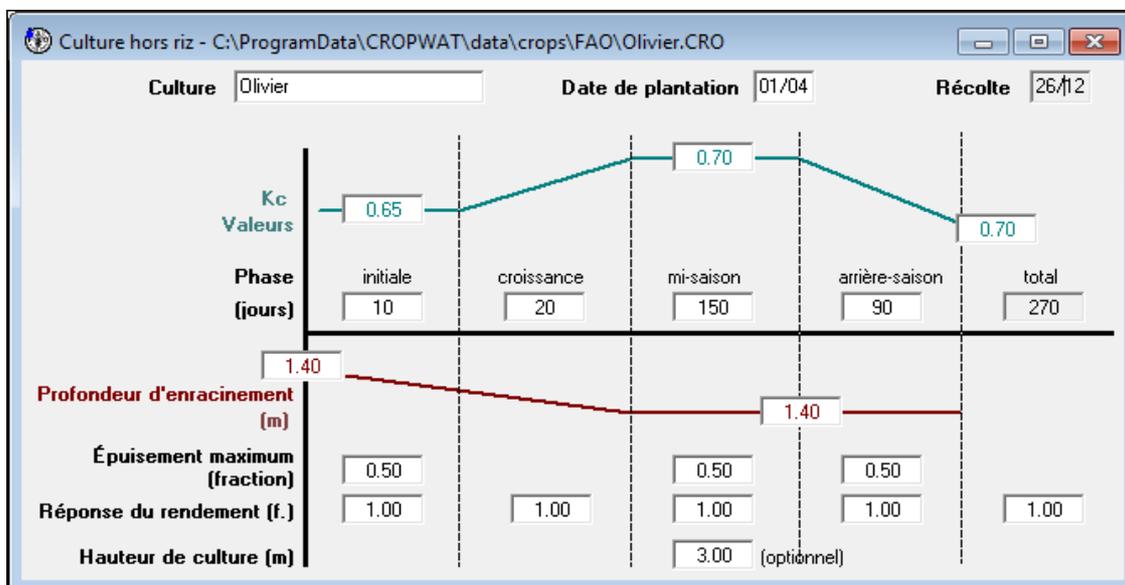


Figure 13: Données liées à la culture sur Cropwat.

Le logiciel Cropwat contient un fichier reprenant les caractéristiques culturelles d'un grand nombre de cultures : **C:\ProgramData\CROPWAT\data\crops**.

L'ensemble des données liées aux cultures entrées dans le Cropwat est résumé dans le tableau 12.

Tableau 12 : Synthèses des données liées aux cultures.

Culture	Durée de phase de développement (jour)					Coefficient cultural Kc			Date de semis ou plantation
	init.	dév.	mi-sai.	arri-sai.	Durée du cycle	Kc init.	Kc mid.	Kc fin.	
Blé	30	140	40	30	240	0,4	1,15	0,25	01-nov
Orge	40	60	60	40	200	0,3	1,15	0,25	01-nov
Parcours	10	20	75	35	140	0,30	0,75	0,75	01-mars
Olivier	10	20	150	90	270	0,65	0,70	0,70	01-mars
Espèces à pépins	30	50	110	30	220	0,45	0,95	0,7	01-fév
Espèces à noyaux	30	40	80	40	190	0,45	0,9	0,65	01-fév
Autres arbres	30	50	130	30	240	0,55	0,80	0,6	01-mars
Pomme de terre	25	30	45	30	130	0,5	1,15	0,75	15-mars
Carottes	20	30	50	20	120	0,7	1,05	0,95	01-mai
Tomates	30	40	45	30	145	0,6	1,15	0,8	01-mai
Oignons	15	25	70	40	150	0,7	1,05	0,85	01-fév
Poivrons	30	40	40	20	130	0,6	1,05	0,9	01-mai
Melon	25	35	40	30	130	0,4	1,05	0,75	01-mai
Courgettes	25	35	25	15	100	0,6	1	0,75	01-mai
Navets	25	35	50	50	160	0,5	1,1	0,95	01-sept
Laitue	20	30	15	10	75	0,7	1	0,95	01-avr
Autres C.M.	20	30	30	10	90	0,5	1,05	0,9	01-mai

Source : Allen et al, 1998 ; Chaoui et Mouhouche, 2006.

En plus de ces données, les valeurs du tarissement admissible du sol (P) et le coefficient de réponse du rendement (kY) de chaque culture sont considérés dans le Cropwat pour distinguer la tolérance des cultures au manque d'eau et indiquer les chutes du rendement probables.

2.3.4. Tarissement admissible du sol (P)

Doorenbos et Kassam (1979) définit le (P) comme étant le niveau critique de l'humidité du sol à partir duquel le stress dû au manque d'eau se fait sentir, affectant l'évapotranspiration et la production de la plante.

2.3.5. Coefficient de réponse du rendement à l'eau (kY)

Le coefficient de réponse du rendement à l'eau met en rapport la baisse du rendement relatif ($1 - Y_a/Y_m$) et le déficit de l'évapotranspiration relative ($1 - ET_a/ET_m$). Le détail sur le kY et ses valeurs se trouvent dans le Bulletin FAO-33 (1987).

3. Calcul de l'évapotranspiration de référence

Etant donné que l'évapotranspiration de référence ou ET_0 représente l'évapotranspiration d'une surface de gazon bien arrosé et coupé court ; les besoins en eau des cultures sont directement reliés à ce paramètre climatique.

Cependant il existe plusieurs méthodes pour déterminer l' ET_0 nous citons quelques unes :

- La formule de Blaney-Criddle,
- La formule de Penman,
- La formule de Turc,
- La méthode du bac d'évaporation,
- La méthode numérique qui se base sur l'équation de Penman-Monteith, qui se représente comme suit :

$$ET_0 = C * [W * R_n + (1 - W) * f(u) (e_a - e_d)]$$

ET_0 : représente l'évapotranspiration de la culture de référence en mm/jour,

W : est un facteur de pondération lié à la température,

R_n : représente le rayonnement net en évaporation équivalente, en m/jour,

$f(u)$: est fonction liée au vent.

4. Critères de la conduite des irrigations

D'après Doorenbos et Pruitt (1975) l'estimation de l'évapotranspiration en vue de la programmation de l'irrigation doit se faire en se basant sur le calcul de l'évapotranspiration maximale (ET_m) et de la pluie efficace (P_{eff}).

4.1. L'évapotranspiration maximale

En matière d'irrigation, on cherche à placer les plantes dans des conditions de production optimales (appelé confort hydrique) et on base l'irrigation sur la valeur de

l'évapotranspiration maximale (ET_m) qui est une valeur ponctuelle liée à l'ET₀ qui est relative à une région par un coefficient cultural.

L'ET_m caractérise l'évapotranspiration d'une culture donnée, à différents stades de croissance lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant et les conditions agronomiques sont optimales (bonne fertilité du sol, apports d'engrais suffisants, bonne état sanitaire ...).

L'ET_m est donnée par la formule suivante :

$$ET_m = kc * ET_0 \dots\dots(1)$$

ET_m : évapotranspiration maximale d'une culture (mm),

kc : coefficient cultural,

ET₀: évapotranspiration de référence (mm).

4.2. Pluie efficace

Pour les productions agricoles, les précipitations efficaces se réfèrent à la part des précipitations qui peut être effectivement utilisée par les plantes. La totalité des précipitations n'est pas disponible pour les cultures puisqu'en effet une partie est perdue par ruissellement et percolation profonde. Le logiciel Cropwat offre la possibilité d'utiliser quatre méthodes pour déterminer les précipitations efficaces:

- Pourcentage fixé de précipitations,
- Précipitations probables,
- Équation empirique.
- Méthode Service USDA Conservation des sols.

La première formule propose un pourcentage fixe, avec A : fraction donnée par l'utilisateur, elle est comprise entre 0,7 et 0,9 :

$$P_{eff} = A * P_{moy} \dots\dots\dots (2)$$

La deuxième formule a été développée à partir de données provenant de zones arides et semi-arides

$$P_{eff} = 0,6 P_{moy} - 10 \dots\dots\dots(3) \quad ; \quad \text{Pour } P_{moy} < 70 \text{ mm/mois}$$

$$P_{eff} = 0,8 P_{moy} - 25 \dots\dots\dots(4) \quad ; \quad \text{Pour } P_{moy} > 70 \text{ mm/mois}$$

- La troisième formule est empirique, elle est développée localement, les coefficients utilisés sont déterminés à partir d'une analyse des données climatiques locales :

$$P_{\text{eff}} = A * P_{\text{moy}} + B \dots\dots (5) \quad ; \quad \text{pour } P_{\text{moy}} < x \text{ mm/mois}$$

$$P_{\text{eff}} = 0,8 P_{\text{moy}} + C \dots\dots(6) \quad ; \quad \text{pour } P_{\text{moy}} > x \text{ mm/mois}$$

- La quatrième formule a été mise au point par le département américain de l'agriculture (USDA), les pertes par percolation et par ruissellement sont incluses :

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{moy}} * (1 - 0,2 * P_{\text{moy}}/125) \dots\dots(7) \quad ; \quad \text{Pour } P_{\text{moy}} < 250 \text{ mm/mois}$$

$$P_{\text{eff}} = 125 + 0,1 * P_{\text{moy}} \dots\dots\dots\dots (8) \quad ; \quad \text{Pour } P_{\text{moy}} > 250 \text{ mm/mois}$$

Le choix de la méthode appropriée pour le calcul de la pluie efficace (P_{eff}) demande une réflexion sérieuse, ainsi différentes méthodes ont été développées, chacune prend en compte le climat de la région en question

Nous avons choisi de travailler avec la méthode l'USDA (7) et (8) pour tenir compte des pertes dues au ruissellement de surface et à la percolation profonde, c'est une formule recommandée par United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service.

5. Calcul des besoins nets en eau d'irrigation

Besoins nets d'irrigation sont déterminés par la relation suivante :

$$B_n = ET_m - P_{\text{eff}} - R \dots\dots(9)$$

ET_m : évapotranspiration maximale (mm),

P_{eff} : Pluie efficace (mm),

R : Reserve disponible au début de la période de calcul (mm) (humidité initiale %).

6. Calendrier d'irrigation

Nous avons fixé les critères de la conduite d'irrigation comme suit :

- irriguer quand la RFU est épuisée à 100%,
- remplir la RFU à 100% (ramener la RFU à la capacité au champ),
- début de pilotage : la première date de plantation de chaque culture.

Sur cette base l'irrigation se fait sans restriction imposée sur les fréquences d'irrigation et la disponibilité en eau, donc c'est une irrigation du confort hydrique.

7. Efficience d'irrigation

Le Cropwat considère une efficience globale fixée à 70%, néanmoins, on peut varier cette efficience selon le système d'irrigation utilisée et la nature du sol.

8. Calcul de l'efficience d'utilisation de l'eau EUE

L'efficience d'utilisation de l'eau s'exprime en (kg/m^3), en d'autres termes c'est le rapport du poids de la production commercialisable en (kg) et le volume d'eau consommé par la culture durant tout son cycle végétatif en (m^3).

Troisième partie :

Résultats et discussions

1. Traitement des données pluviométriques

1.1. Calcul de la pluie efficace

La pluie efficace (ou précipitation efficace) est la partie des précipitations qui contribue à satisfaire les besoins en eau de la culture et/ou le besoin net d'eau d'irrigation. Le tableau 13 donne les valeurs de la pluie efficace calculée par la méthode du département américain de l'agriculture (USDA) :

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{moy}} * (1 - 0,2 * P_{\text{moy}}/125) \dots\dots(7) ; \quad \text{Pour } P_{\text{moy}} < 250 \text{ mm/mois}$$

$$P_{\text{eff}} = 125 + 0,1 * P_{\text{moy}} \dots\dots\dots(8) ; \quad \text{Pour } P_{\text{moy}} > 250 \text{ mm/mois}$$

Tableau 13 : Calcul de la pluie efficace (mm) (1975 – 2009).

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
P	35,7	29,6	28,7	30,5	33,9	18,7	11	21,2	32,8	26,1	31,1	27,6	326,9
P_{eff}	33,7	28,2	27,4	29	32,1	18,1	10,8	20,5	31,1	25	29,6	26,4	311,8

Source : ONM Djelfa.

La moyenne annuelle des précipitations dans la wilaya de Djelfa est de 326,9 mm. Cependant, la quantité de cette pluie qui est utilisée par les cultures est de 311,8 mm (4,6 % perdue par ruissellement, percolation profonde et/ou évaporation).

1.2. Détermination de l'année sèche et de l'année humide

La détermination de l'année humide, normale et sèche est utilisée pour la gestion de l'eau et les aménagements hydro agricoles.

La connaissance de la variabilité interannuelle des besoins en eau d'irrigation nécessite une étude fréquentielle des pluies, à partir des relevés pluviométriques réalisés sur un nombre d'année assez long. Cette analyse permettra de déterminer la hauteur de pluie dont on est sûr de dépasser avec une probabilité donnée.

Pour notre étude, nous avons utilisé les pluies moyennes annuelles de la station météorologique de Djelfa entre 1975 et 2009 (35 années).

Nous avons classé les hauteurs des pluies selon les probabilités de dépassement de 20%, 50%, et 80%, respectivement de l'année humide, normale et sèche comme suit :

- a) classer l'échantillon par ordre de grandeur décroissant,

b) classier la position relevée selon la formule de Weibull:

$$FD = 100 \times \frac{m}{(n+1)} \dots\dots\dots (10)$$

Avec :

FD : fréquence au dépassement,

m : numéro du rang,

n : nombre total d'observations.

c) reporter les valeurs dans le graphique de pluies en fonction de Fa comme l'indique la figure 14,

d) sélectionner les valeurs annuelles correspondant à une probabilité de 20, 50 et 80% en utilisant l'équation de la droite de régression : $P = -2,733*FD + 461,9$

e) déterminer les valeurs mensuelles pour l'année sèche par la relation suivante :

$$P_{i \text{ sec}} = P_{i \text{ moy}} \times \frac{P_{\text{sec}}}{P_{\text{moy}}} \dots\dots\dots (11)$$

Où :

$P_{i \text{ sec}}$: pluie mensuelle de l'année sèche pour le mois i,

$P_{i \text{ moy}}$: pluie moyenne mensuelle pour le mois i,

P_{sec} : pluie annuelle à une probabilité de dépassement de 80%,

P_{moy} : pluie moyenne annuelle.

La détermination des valeurs pour l'année humide et normale peuvent se faire de la même manière.

Tableau 14 : Calcul des fréquences au dépassement.

Ordre	P (mm)	FD (%)	Ordre	P (mm)	FD (%)
1	510	2,78	20	324,91	55,56
2	451,5	5,56	21	298,7	58,33
3	447,4	8,33	22	295,3	61,11
4	438,8	11,11	23	291,58	63,89
5	434,4	13,89	24	291,4	66,67
6	397,38	16,67	25	288	69,44
7	393,3	19,44	26	272	72,22
8	391	22,22	27	270,2	75
9	387,9	25	28	259,67	77,78
10	376	27,78	29	243,6	80,56
11	371	30,56	30	223,98	83,33
12	367,6	33,33	31	217,35	86,11
13	363,4	36,11	32	212,8	88,89
14	355,1	38,89	33	206,77	91,67
15	347,48	41,67	34	187,48	94,44
16	337,3	44,44	35	187,48	97,22
17	336,1	47,22	Moyenne (mm)	Ecart-type	
18	333,5	50	326,87	81,55	
19	330	52,78			

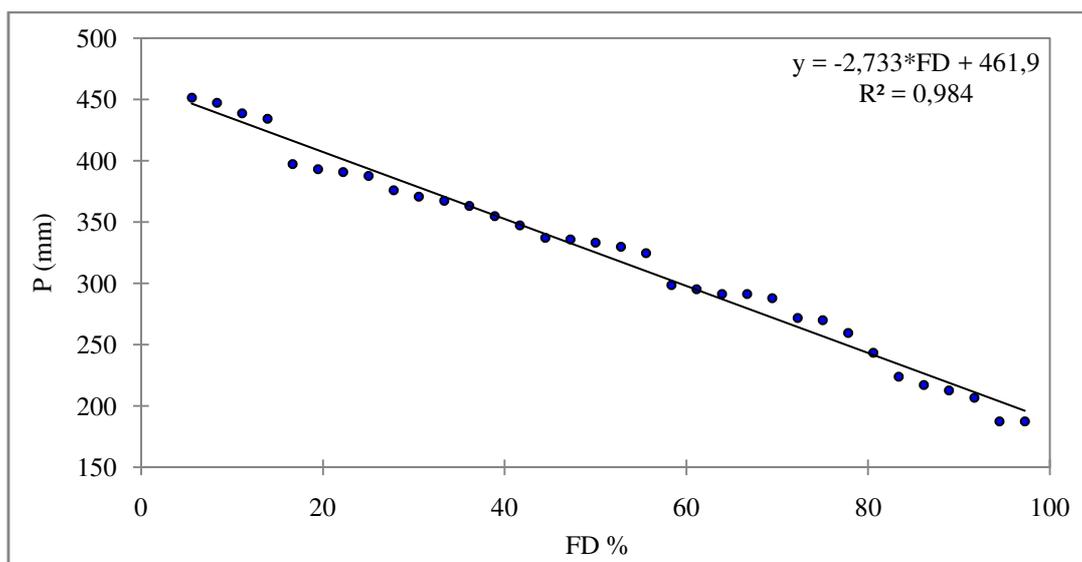


Figure 14 : Etude fréquentielle des pluies moyennes annuelles.

A partir de l'équation de la droite de régression, on détermine les valeurs correspondantes aux probabilités de 20%,50% et de 80%.

$$y = -2,733*FD + 461,9 \dots\dots\dots (12)$$

On constate que les précipitations dans les années normales (probabilité de 50%) sont de l'ordre de 325,25 mm, d'une manière générale, bien représentées par les précipitations moyennes 326,87 mm. Le tableau 15 indique les valeurs de pluies moyennes par mois d'après la relation ci-dessus pour l'année humide et sèche.

Tableau 15 : Les pluies mensuelles de l'année sèche et humide (mm).

Année	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Som.
Sèche	26,55	22,01	21,35	22,7	25,25	13,9	8,17	15,77	24,42	19,43	23,14	20,56	243,3
Humide	44,45	36,85	35,75	38	42,27	23,28	13,68	26,39	40,88	32,53	38,73	34,42	407,2

Les variations entre les années sont assez notables. Ca peut varier du simple au double, allant de 243 mm pour une année sèche à 407 mm pour une année humide, donc la moyenne ne veut pratiquement rien dire. La variation interannuelle de la pluviométrie se reflète sur l'état du couvert végétal à travers la réserve en eau pour la satisfaction des besoins en eau des cultures.

2. Calcul des besoins en eau d'irrigation

2.1. Estimation de la demande climatique ET₀

L'évapotranspiration de référence mensuelle moyenne a été estimée sur la région de Djelfa située dans les hauts plateaux, par la formule de Penman Monteith qui reste la référence, par l'intermédiaire du logiciel Cropwat 8.0 sur une série des données climatiques (la température, l'humidité relative, la durée insolation, la vitesse du vent) et recueillies au niveau de la station météorologique (ONM) de Djelfa, entre 1975 et 2009 (Tableau 16).

Tableau 16 : Données climatiques de la wilaya de Djelfa (1979-2009).

Mois	Temp Min °C	Temp Max °C	Humidité %	Vent km/j	Insolation h
Janvier	0,3	9,8	76	311	6,4
Février	1,6	11,9	70	313	6,6
Mars	3,2	15,1	63	336	8,1
Avril	5,8	17,7	58	370	8,6
Mai	10,1	23,4	53	334	9,8
Juin	15,1	29,9	43	293	10,2
Juillet	18,1	33,6	36	265	10,5
Août	17,9	33	39	244	10,1
Septembre	13,9	27,3	52	234	8,2
Octobre	9,3	21,2	62	255	8
Novembre	4,3	14,5	71	280	6,5
Décembre	1,8	10,7	76	329	5,8
Moyenne	8,4	20,7	58	297	8,2

Source : ONM Djelfa.

L'évolution de l'évapotranspiration de référence au long de l'année est représentée par la figure 15 :

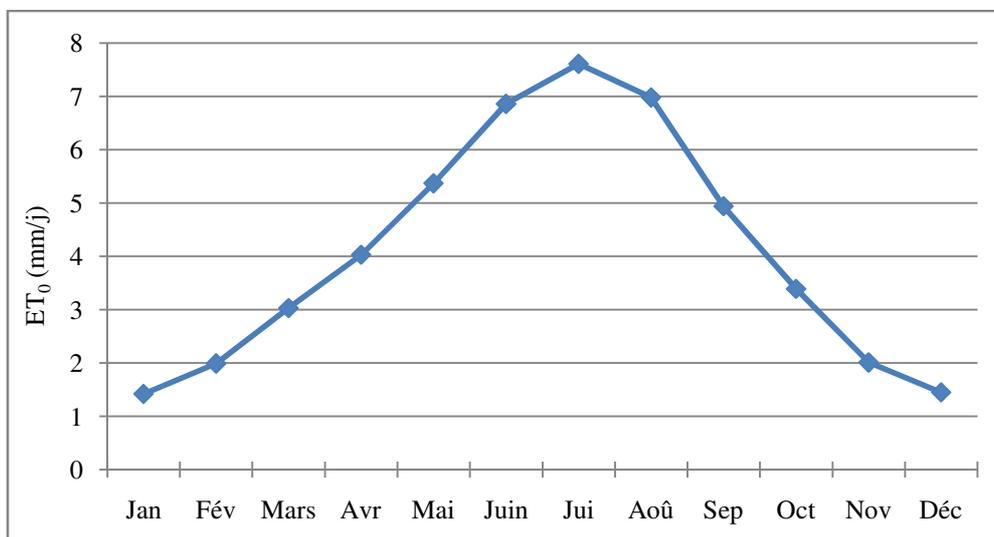


Figure 15 : Evolution de L'ET₀ mensuelle dans la wilaya de Djelfa.

D'après la figure 15, on constate que le mois de juillet présente l'ET₀ la plus importante qui est de l'ordre de 7,6 mm/j, ce qui peut être expliqué par les valeurs relativement importante de la température maximale et les vitesses du vent qui atteignent respectivement les 33,6 °C et 370 Km/j.

2.2. Besoins en eau des cultures ETM

Selon la FAO, Le besoin en eau d'une culture durant une période donnée est la hauteur d'eau (mm) nécessaire pour compenser les pertes par évapotranspiration pendant cette période.

Dans notre étude, les cultures sont conduites sous un régime hydrique ETM qui est la quantité d'eau maximale évapotranspirée par une culture donnée conduite sans restriction hydrique, à un stade végétatif donnée, et dans des conditions climatiques données. Ainsi :

$$ETM \text{ (mm)} = kc * ET_0 \text{ (mm)} \dots\dots\dots (13)$$

Où Kc est le coefficient cultural qui dépend du stade de la culture, ajusté théoriquement d'après la longueur du cycle végétatif de la culture par le logiciel Cropwat.

Dans les zones arides et semi arides qui se caractérisent par des ressources hydriques limitées, il n'est pas économique de conduire les cultures sous un régime hydrique ETM. Cette dernière se caractérise par une forte consommation d'eau sans être économiquement rentable (Mouhouche, 2010).

Les valeurs de l'ETM pour chaque culture ont été déterminées par le logiciel Cropwat en totalisant les besoins de chaque décade (Figure 16).

Pour les cultures qui ne figurent pas dans ces documents et pour plus de praticité, nous avons essayé de mettre les cultures similaires en groupes de cultures ayants des valeurs semblables pour tous les paramètres culturaux.

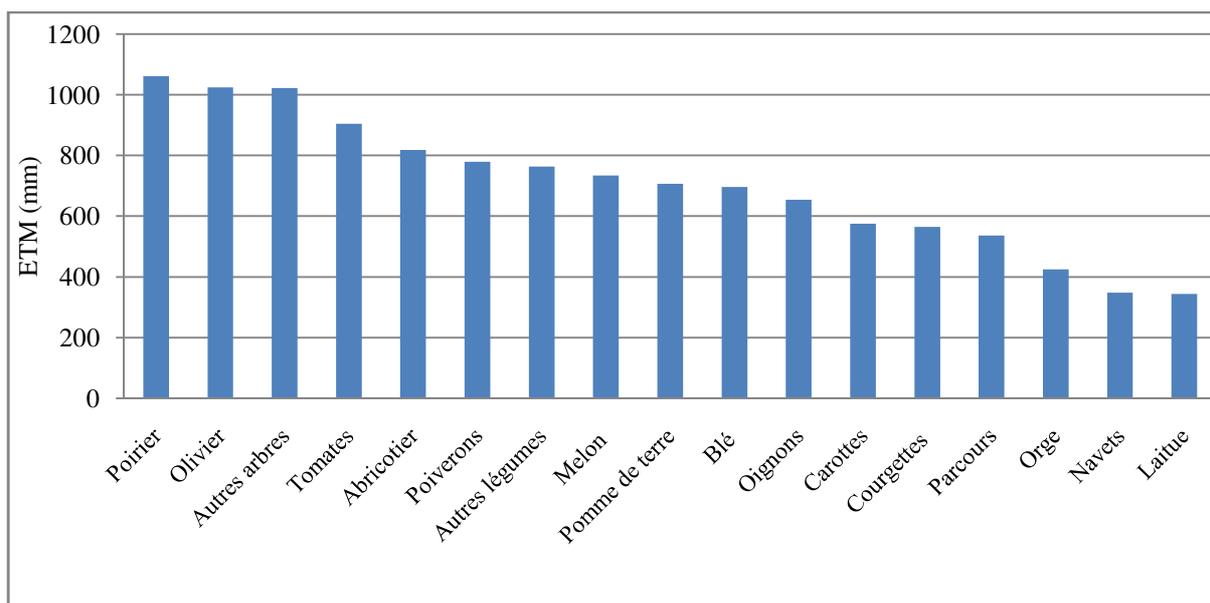


Figure 16 : Besoins en eau annuels par culture dans la zone d'étude.

Les besoins annuels en eau des cultures varient entre un maximum de 1 061 mm pour le poirier et un minimum de 344 mm pour la laitue (Figure 16).

A titre indicatif, le poirier présente une ETM de 829 mm dans le périmètre de la Mitidja ouest, cela pourrait être expliqué par les différents paramètres climatiques qui sont très important vue le caractère aride de la région.

2.3. Besoins en eau d'irrigation

Les besoins en eau d'irrigation pour toute la durée du cycle végétatif de la culture, sont calculés par la différence de l'évapotranspiration de la culture (ETM) et les précipitations efficaces.

Les besoins en eau d'irrigation en année sèche et en année humide pour les périodes de retour respectivement $T = 1,25$ ans et $T = 5$ ans, sont présentés dans les tableaux en Annexe A. Le tableau 17 montre les besoins en eau d'irrigation (en année normale, période retour $T = 2$ ans) de toutes les cultures pratiquées dans la wilaya de Djelfa à l'aide du logiciel Cropwat.

Tableau 17 : Besoins en eau d'irrigation (mm).

Culture	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Som.
Blé	1,9	19,8	68,4	115	170	109							484
Orge	7	38,8	85	93,5	22,4								247
Olivier			38,4	65	97	139	169	144	83,5	54	15		805
Poirier			31	87	140	191	229	183	25,5				888
Abricotier			33,4	87,8	132	181	193	42,4					670
Autres arbres			24	50,8	106	156	189	162,5	97	45			832
Pomme de terre			13,8	57,4	165	222	148						607
Carottes			41,3	95,5	151	180							468
Tomates					68,7	159	261,8	229	88,6				802
Oignons		14,6	72,9	104	150	178							519
Poivrons					68,6	145	239,5	207	27,8				688
Melon					37,4	150	242	192	22				643
Courgettes					70	158,5	226,4	42,8					498
Navets	14,3	2,5							45,1	64,6	41,1	25,3	193
Laitue				59	131	82,4							273
Autres maraîchage					35,1	115	233	210	68				661
Parcours			20,1	66,1	98,6	140	98,6						424

D'après le tableau 17, on constate que les besoins d'irrigation s'avèrent plus élevés durant les mois de juin, juillet et août, vu les faibles précipitations dans la région (le mois le plus sec correspond à juillet avec 11 mm).

Dans la région d'étude, le poirier est la culture la plus exigeante en eau d'irrigation avec 8880 m³/ha nette de mars jusqu'au mois de septembre tandis que la culture des navets est la moins consommatrice en eau d'irrigation avec 1929 m³/ha nette de septembre jusqu'à février.

3. Calcul de l'eau virtuelle par culture

Rappelons que dans le cas des produits agricoles, l'eau virtuelle est l'eau évapotranspirée par les cultures (besoins en eau des cultures ETC).

D'après Doorenbos et Pruitt (1975) le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration. Les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les engrais, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le taux d'évapotranspiration.

La quantité d'eau virtuelle est la somme des quantités de l'eau verte provenant des précipitations et présente naturellement dans le sol et de l'eau bleue ou eau d'irrigation qui provient des retenues, des barrages ou pompée dans des nappes souterraines et les cours d'eau.

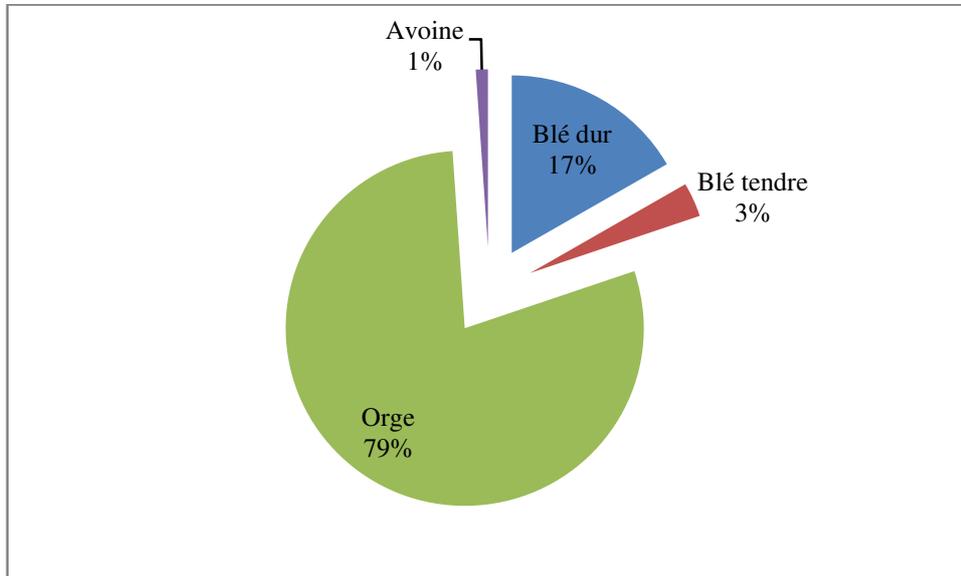
Afin de quantifier l'eau consommée par chaque culture le long du cycle végétatif, nous avons calculé l'évapotranspiration maximale (qui inclue l'eau verte et l'eau bleue) et multiplier par la superficie réelle respective de chaque culture pour obtenir leurs besoins globaux dans la wilaya.

3.1. Les céréales

La céréaliculture est pratiquée sur l'ensemble du territoire et se fait dans les plaines du nord-est, dans la vallée de l'Oued Touil et notamment dans les dayas. Sa pratique est généralement extensive avec des rendements en pluviale très faibles de l'ordre de 5 quintaux par hectare selon la DSA de la wilaya de Djelfa.

Sur la période de calcul 2009-2012, les céréales occupent une place dominante dans la wilaya de Djelfa par sa grande superficie de 37 377 ha, soit 66,6% de la superficie cultivée.

La figure 17 illustre la répartition de la superficie moyenne récoltée par espèce de céréales est comme suit : 79% pour l'orge, 17% pour le blé dur, 3% pour le blé tendre et 1% pour l'avoine.



Source : DSA Djelfa.

Figure 17 : Répartition de la superficie moyenne des céréales (2009-2012).

Dans la zone d'étude, les besoins en eau (ETc) du blé et de l'orge estimés par le Cropwat sont de 696 mm/an et 425 mm/an respectivement.

Les besoins en eau d'irrigation annuels (ou l'irrigation de complément) sont de 4841 m³/ha pour le blé et 2471 m³/ha pour l'orge.

Les besoins en eau d'irrigation dans la wilaya de Djelfa dépassent les besoins en eau d'irrigation de complément défini par la FAO en 1986 dans les zones arides et qui sont fixés à 1500 m³/ha (Lani, 2011). Le tableau 18 donne le volume de l'eau verte et de l'eau bleue des céréales dans la wilaya de Djelfa.

Tableau 18 : Volume de l'eau verte et de l'eau bleue des céréales (Hm³).

Culture	Eau verte	Eau bleue	Eau virtuelle
Céréales plu.	69,9	0	69,9
Céréales Irr.	5,1	8	13,2
Total	75	8	83,1

Les 34 821 ha de céréales pluviales consomment un volume de l'eau verte (pluie efficace) de l'ordre 69,9 Hm³/ an. Néanmoins, les pertes par ruissèlement, évaporation et/ou percolation profonde sont de l'ordre 43,9 Hm³ soit 38,6% de la pluie totale (Tableau 18).

Comme nous l'avons déjà énoncé, les céréales irriguées occupent seulement 2 556,3 ha soit 6,8% de la superficie céréalière totale qui est de 37 377,3 ha.

Le volume d'eau bleue (Irrigation de complément) est de 8 Hm³/an, représentant 9% de l'eau virtuelle contenue dans les céréales produites dans la région de Djelfa.

Les volumes de l'eau verte et de l'eau bleue sur une année sèche et humide sont décrits dans l'Annexe B.

3.2. Les cultures fourragères

Le rôle des cultures fourragères est lié en grande partie au rôle de l'élevage qui les valorise. Par ailleurs, ces cultures ont aussi d'autres intérêts agronomiques et économiques. Elles occupent dans la région de Djelfa, au titre de la campagne 2011-2012, une superficie consacrée aux cultures fourragères est de 3 331 ha. L'orge en vert est principales espèces cultivées dans la région (DSA, 2012).

Les cultures fourragères dont l'orge en vert est l'espèce la plus cultivée ont les besoins en eau de l'ordre de 424,7 mm/an. Ainsi, les besoins en eau totaux ou l'eau virtuelle des cultures fourragères sont évalués à 6,5 H m³ qui représente seulement la part de l'eau verte effectivement consommée par la culture.

3.3. Les arbres fruitiers

L'arboriculture fruitière est pratiquée généralement dans les zones du nord-est, du nord-ouest de la Wilaya et dans la vallée de l'Oued Djedi. Sur la période de calcul 1998-2012, elle occupe plus de 10 263 ha représentant 18% de la surface totale cultivée qui est de 56 118,7 ha.

Les besoins en eau des arbres fruitiers sont variables selon la culture (saison, précoce ou tardive), entre les variétés elles mêmes, ces besoins peuvent être variables également suivant l'âge de l'arbre, et sa bonne conduite (la taille etc.).

Tableau 19 : Volume d'eau verte et d'eau bleue des arbres fruitiers (Hm³).

Cultures	Eau verte	Eau bleue	Eau virtuelle
Olivier	7,4	27,2	34,6
Espèces à pépins	5,7	29,3	35
Espèces à noyaux	3,8	17	20,8
Autres arbres	1,90	8,60	10,60
Total	18,8	82,1	101

3.3.1. L'olivier

L'olivier représente la principale culture fruitière dans la région de Djelfa. Elle occupe une surface de l'ordre de 3 384 ha soit 6% de la surface totale cultivée et 33% de la surface des arbres fruitiers.

Les besoins en eau (ETc) de l'olivier sont de 1024 mm/an. Ce qui fait un besoin d'irrigation 805 mm/an à apporter en 9 irrigations du mois de mars jusqu'au mois de novembre

L'olivier consomme un volume de 34,6 Hm³/an pour l'ensemble de la wilaya dont les apports de précipitations (pluie efficace) sont de l'ordre 7,4 H m³/an soit 21% de volume total.

La période la plus intense du cycle annuel de l'olivier se déroule de Mars à Juin. Au cours de cette phase, les oliviers ont besoin d'une quantité importante d'eau et de nutriments.

3.3.2. Les espèces à pépins

Dans la région d'étude, les espèces à pépins (pommier, poirier et cognassier) occupent durant la période 1998-2012 une surface de 3 302 ha soit 5,8% de superficie cultivée.

Les besoins en eau (ETc), sont de l'ordre de 1061 mm/an et Les besoins en eau d'irrigation sont de 887 mm/an.

Le volume total consommé par les espèces à pépins est évalué à 35 H m³/an pour l'ensemble de la wilaya. Les pluies efficaces couvrent 16% de ces besoins.

Les phases végétatives sensibles généralement aux déficits hydriques sont : la floraison, la nouaison, et le grossissement des fruits.

3.3.3. Les espèces à noyaux

Sur la même période de calcul, la surface consacrée aux arbres fruitiers à noyaux (abricotier, prunier, pêcher, et amandier) est de 2 538,3 ha soit 4,5% de la superficie totale cultivée.

Les besoins en eau totaux des espèces à noyaux dans la région de Djelfa est de 819 mm/an et l'apport d'irrigation est de l'ordre de 670 mm/an.

Sur l'ensemble de la wilaya, les espèces à noyaux consomment un volume d'eau de l'ordre de 20,8 H m³/an, les apports de l'eau verte couvrent 18% soit 3,8 H m³/an.

Les arrosages ne s'effectuent que pendant l'été à savoir le premier mois de la maturité de fruits, les 2 autres après la cueillette ce qui aide l'arbre à reconstituer son potentiel de production pour l'année suivante.

3.4. Les cultures maraîchères

Les cultures maraîchères sont pratiquées généralement dans les plaines du nord, dans les vallées et dans les plaines de l'Atlas Saharien et occupent une surface de l'ordre de 5 146,8 ha soit 9,2% de la superficie totale cultivée sur la période 1998-2012.

Les quantités d'eau verte, et d'eau bleue des cultures maraichères pratiquées dans la wilaya de Djelfa en année normale sont présentées dans le tableau 20.

Tableau 20 : Volume de l'eau verte et de l'eau bleue (m³).

Cultures	Eau verte	Eau bleue	Eau virtuelle
Oignons	1 872 371,5	7 210 504,2	9 082 875,7
Pomme de terre	1 278 755,4	7 651 093,7	8 929 849,1
Carottes	671 795,5	2 976 639,4	3 648 435,0
Melon	320 927,6	2 331 348,3	2 652 275,8
Tomates	235 783,4	1 810 229,5	2 046 012,8
Autres maraîchage	251 868,8	1 678 786,8	1 930 655,6
Poivrons	198 390,5	1 542 289,6	1 740 680,1
Courgettes	189 498,5	1 435 804,5	1 625 303,1
Laitue	193 747,6	748 919,5	942 667,1
Navets	354 455,8	448 357,5	802 813,2
Total	5 567 594,6	27 833 973,0	33 401 567,5

3.4.1. Oignon et ail

Dans la région de Djelfa, l'oignon et l'ail ont les besoins en eau totaux (ETc) de l'ordre 654 mm/an. Les apports d'irrigation sont estimés à 520 mm/an, ce qui donne un volume d'eau total consommé de l'ordre de 9 Hm³/an, sachant que la surface réservée à la culture est de 1 388 ha.

Le taux de couverture de volume total par les pluies n'est que de 20% soit 1,8 Hm³/an, le reste doit être apporté par irrigation estimé à 7,2 Hm³/an.

3.4.2. Pomme de terre

Les besoins en eau de la pomme de terre (ETc) dans la wilaya de Djelfa sont estimés à 706 mm/an. Les compléments d'irrigation sont de 607 mm/an avec 6 irrigations du mois de mars jusqu'au mois de juillet.

La pomme de terre est relativement sensible au déficit hydrique. Pour optimiser les rendements, la quantité totale d'eau du sol disponible ne doit pas baisser de plus de 30 à 50%.

Les besoins en eau totaux de la pomme terre sur l'ensemble de la wilaya sont évalués à 8,9 Hm³/an pour une surface de 1 261 ha. Les pluies efficaces couvrent 1,2 Hm³/an soit 13,5% des besoins.

3.4.3. Carottes

La superficie allouée à la culture est de 636 ha. Les besoins en eau totaux (ETc) de la carotte est de 575 mm/an, et ses besoins en eau d'irrigation sont de 468 mm/an répartis sur 4 irrigations de mars jusqu'au mois de juin.

Le volume d'eau total consommé est évalué à 3,6 Hm³/an, dont la part de l'eau verte est de 671 796 m³/an soit 18% des besoins.

3.4.4. Tomates

La tomate est une plante de climat tempéré chaud, ses besoins en eau totaux (ETc) sont estimés à 905 mm/an, ce qui nécessite des besoins en eau d'irrigation de 802 mm/an du mois de mai jusqu'au mois de septembre.

La culture de tomate est particulièrement sensible au déficit hydrique pendant et immédiatement après le repiquage, ainsi que pendant la floraison et la formation du fruit.

La surface consacrée à la culture est de l'ordre de 226 ha, ce qui nécessite des besoins en eau de l'ordre 2 Hm³/an sur l'ensemble de la wilaya. Le taux de couverture des besoins en eau par la pluie n'est que de 11% représentant 235 783 m³/an.

3.4.5. Poivrons et piments

Dans la wilaya de Djelfa les besoins en eau totaux (ETc) du poivron sont de 780 mm/an. Les besoins en eau d'irrigation sont estimés à 688 mm/an du mois de mai jusqu'au mois de septembre.

Pour obtenir des rendements élevés de poivron, il faut un apport d'eau suffisant et des sols relativement humides pendant tout le cycle végétatif, mais surtout juste avant la floraison et au début de celle-ci. Le tarissement de l'eau du sol pendant cette période ne devrait pas dépasser 25% au risque d'une diminution de nombre de fruit.

La surface de la culture est de 224 ha, ses besoins en eau sur l'ensemble de la wilaya sont évalués à 1,7 Hm³/an. Les pluies efficaces assurent un volume de 198 390 m³/an soit un taux de 11% seulement des besoins.

3.4.6. Melon et pastèque

Les besoins en eau du melon sont de 734 mm/an ce qui fait un complément d'irrigation de 643 mm/an de mai jusqu'à septembre.

La culture de pastèque exige d'être irriguée tout au long de son cycle. Le début et la fin de la période végétative, la période de floraison, et de formation de fruit sont celles qui craignent le plus le manque d'eau, alors que pendant la période de mûrissement un apport d'eau limité améliore la qualité de fruit.

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la culture consomme un volume de 2,6 Hm³/an. L'eau verte représente 320 927 m³/an soit un taux de 12%.

3.4.7. Courgette et concombre

Dans la zone d'étude, les besoins en eau totaux de la culture de courgettes sont de 565 mm/an. Les compléments d'irrigation sont estimés à 498 mm/an de mai jusqu'à août.

Sur l'ensemble de la wilaya les besoins en eau totaux sont de l'ordre de 1,6 Hm³/an. Les pluies efficaces couvrent un volume de 189 498 m³/an soit 11% du volume total consommé.

3.4.8. Navets

Pour la culture des navets, les besoins eau totaux (ETc) sont estimés à 348 mm/an et les besoins en eau d'irrigation sont de 193 mm/ha du mois de septembre jusqu'au mois de février.

Les besoins en eau à l'échelle de la wilaya sont estimés à 802 813 m³/an sachant que la culture occupe une superficie de l'ordre de 232 ha. L'apport de l'eau verte est de 354 455 m³/an soit un taux de 44% des besoins.

3.4.9. Laitue

La culture de laitue est la moins exigeante en eau dans la wilaya de Djelfa, ses besoins en eau totaux (ETc) sont de 344 mm/an. Les besoins en eau d'irrigation sont estimés à 273 mm/an avec 3 irrigations de mai jusqu'au mois de juin.

Sur l'ensemble de la wilaya, les besoins totaux sont évalués à 942 667 m³, dont la part de l'eau verte est de 193 747 m³/an soit 20% des besoins.

3.5. Les parcours

Les parcours sont constitués d'une végétation basse et discontinue composée de petits plants en touffes plus ou moins dispersées d'inégale valeur tant par sa composition floristique que par sa densité.

Les parcours couvrent une superficie très importante de l'ordre de 2 122 428 ha représentant 65,8% de la superficie totale de la wilaya.

Théoriquement les besoins en eau totaux ETc des parcours sont évalués par le biais du logiciel Cropwat à 5360 m³/ha, ce qui fait des besoins en eau d'irrigation de l'ordre de 9 milliards de m³ chose qui n'est pas faisable.

En effet, si on considère que les parcours dans la région ne consomment que « l'eau verte » qui est de l'ordre 1128 m³/ha. De ce fait la quantité d'eau verte consommée effectivement par les parcours est de l'ordre 2,39 milliards de m³ (65,5% perdues par ruissèlement, évaporation et/ou percolation profonde dans le sol).

4. Calcul des quantités d'eau virtuelle par secteur

La figure 18 montre les quantités d'eau virtuelle consommée et les surfaces cultivées sur une période de 15 ans (1997-2012) pour l'ensemble des cultures à l'exception des céréales qui est calculée sur les trois dernières années (2009-2012).

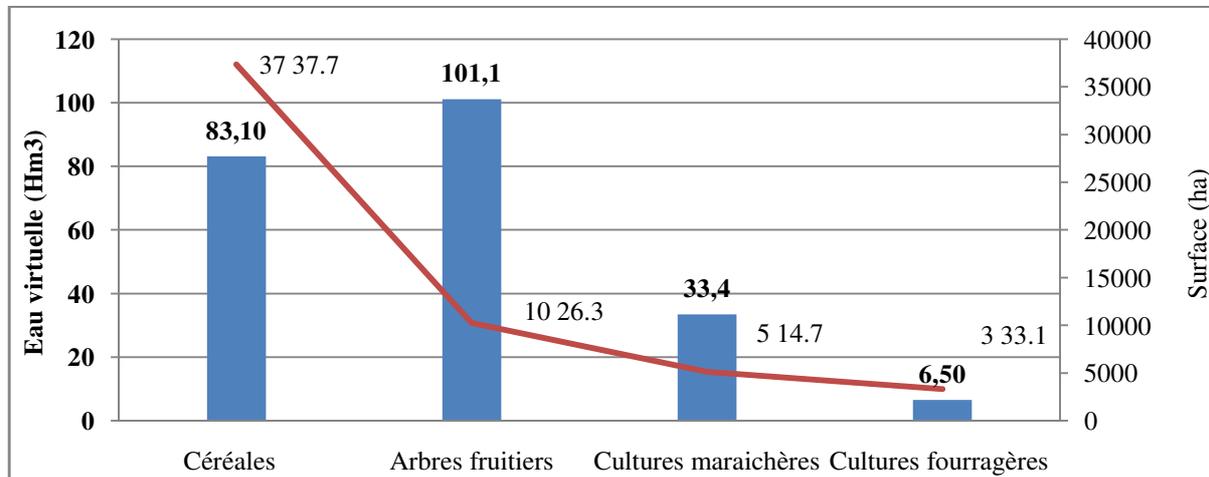


Figure 18 : Eau virtuelle agricole par secteur dans la wilaya de Djelfa.

Les résultats montrent que pour une surface cultivée est de 56 118,7 ha, les cultures pratiquées dans la wilaya de Djelfa consomment 224,1 M m³ d'eau virtuelle en année normale. Ce qui dépasse le volume total des ressources en eau souterraines mobilisées, tout usage confondu, qui est de l'ordre 207 H m³ /an (ANRH, 2012).

Selon l'ANRH, (2012) la part consacrée à l'irrigation à travers la wilaya de Djelfa est de l'ordre de 74 H m³/an ce qui couvre seulement 33 % de l'eau virtuelle agricole dans la région.

La culture la plus exigeante en eau dans la région est arboriculture fruitière qui occupe 10 263,47 ha, soit 18,3% de la cultivé, nécessite 101,1 H m³/an d'eau virtuelle.

Les céréales représentent 66,6% des surfaces cultivées soit 37 377 ha et consomment 83,1 H m³/an, cette quantité d'eau dépend essentiellement de la part de la pluie utilisée (les céréales irriguées ne représentent que 6,8% de la superficie céréalière totale).

Les cultures maraichères occupent 5 147 ha, ce qui fait 9,2% de la surface cultivée, consomment un volume 33,4 H m³/an.

Les cultures fourragères représentent la culture la moins pratiquée dans la zone d'étude avec 3 331 ha, soit 5,9 % seulement de superficie cultivée ont les besoins en eaux les plus faibles avec 6,5 H m³ /an.

5. Quantité d'eau virtuelle agricole sur année humide, normale et sèche

La figure ci-dessous montre la répartition de la part de l'eau bleue et de l'eau verte entre années humide, normale et sèche.



Figure 19 : Répartition de l'eau verte et bleue (Hm³) sur une année humide normale et sèche.

Les résultats obtenus, montrent que les besoins en eau globaux des cultures varient d'une année à une autre selon les conditions climatiques.

Le volume de l'eau consommé par les cultures varie de 242,6 Hm³ pour une année humide, 224,1 Hm³ pour une année normale et 205 Hm³ pour une année sèche. Cette différence est due au volume de l'eau verte qui dépend entièrement de l'eau de pluie stockée dans le sol.

6. Efficience d'utilisation de l'eau EUE

Les définitions du terme "efficience" utilisé par la communauté intéressée par l'irrigation diffèrent selon les disciplines scientifiques concernées. Du point de vue agronomique, l'efficience d'utilisation de l'eau par la culture, EUE, est défini comme étant le rapport entre le rendement récoltable (grain, biomasse totale, sucre, pivot de betterave, etc) et l'eau utilisée pour aboutir à cette production par unité de surface (Bouaziz et Belabbes, 2002).

L'efficience d'utilisation de l'eau s'exprime en kg/m³, donc

$$Eff = \frac{m (kg)}{v (m^3)} \dots \dots \dots (14)$$

Dans laquelle :

Eff : L'efficience d'utilisation de l'eau en kg/m³,

m : le poids de la production commercialisable en kg,

v : volume d'eau consommé par la culture en m³,

L'efficacité d'utilisation de l'eau par tonne de cultures primaires diffère sensiblement entre les cultures et entre les régions de production. Les cultures à haut rendement ou une fraction importante de la biomasse des cultures qui sont récoltées ont généralement une meilleure efficacité d'utilisation d'eau que les cultures avec un rendement faible ou petite fraction de la biomasse des cultures récoltées.

6.1. Les céréales

6.1.1. Efficacité des céréales conduites en pluviale

A l'échelle nationale, le rendement moyen des céréales conduites en pluviale varie entre 7 et 18 quintaux par hectare, soit une moyenne pondérée de 11 quintaux par hectare (Lani, 2010). Les rendements moyens des céréales dans la wilaya de Djelfa conduites en pluviale est de 5 quintaux par hectare ce qui est faible par rapport à la moyenne nationale.

L'efficacité moyenne d'utilisation de l'eau pour les cultures céréalières au niveau mondial est de 0,6 kg/m³ (Mekonnen et Hoekstra, 2010).

Dans la wilaya de Djelfa l'efficacité d'utilisation de l'eau des céréales conduite en pluviale est de 0,25 kg/m³, pour une production moyenne interannuelle sur la période 2009-2012 qui est de 173 120 quintaux et un volume de l'eau verte de 69,9 Hm³ ce qui fait que pour produire un kilogramme de céréale il faudrait 4 m³ si on ne prend en compte que la part des pluies efficaces. Par contre si on considère l'eau totale consommée (ce qui est plus juste), il faudra plus de 4 m³/kg de céréales.

6.1.2. Efficacité des céréales en irriguée

A l'échelle nationale, l'irrigation des céréales donne théoriquement des rendements de l'ordre de 21 à 28 quintaux par hectare. La production des céréales conduites en irriguée contribue théoriquement à hauteur de 2% dans la production nationale moyenne et l'irrigation de complément de 1,2 m³ en moyenne produit un kg de céréales (Lani, 2011).

Dans la wilaya de Djelfa la production céréalière d'une superficie irriguée de 34 821 ha est de l'ordre de 54 160 quintaux, ainsi le rendement moyen des céréales irriguées est de

21 quintaux par hectare ce qui donne une efficacité d'utilisation de l'eau de $0,4 \text{ kg/m}^3$ ou bien le volume d'eau nécessaire pour produire un kg de céréales est de $2,4 \text{ m}^3$.

Ainsi l'apport d'un volume d'eau de $3655 \text{ m}^3/\text{ha}$ permet de produire en moyenne 16 quintaux de plus par hectare, soit une efficacité d'utilisation de l'eau bleue de $4,3 \text{ kg/m}^3$, Ceci montre l'importance de l'irrigation de complément dans la région d'étude.

6.2. Les cultures fourragères

Les cultures fourragères jouent un rôle très important pour l'économie de la Wilaya dans la mesure où sa production est d'un apport considérable pour l'alimentation du cheptel. La production fourragère commence à connaître un essor important.

Dans la région d'étude, durant la période 2007-2011, le rendement de l'orge en vert est en moyenne 206 q/ha (DSA, 2012), ce qui est supérieur à la moyenne nationale qui est de 87 q/ha sur la même période.

D'après ces données, l'efficacité d'utilisation de l'eau des fourrages consommés en vert est en moyen de 10 kg/m^3 . Ainsi la région de Djelfa la production d'un kg de matière verte nécessite $0,1 \text{ m}^3$ d'eau.

6.3. Les arbres fruitiers

Sur la période de calcul (1998 – 2012) les valeurs de l'efficacité d'utilisation de l'eau calculées pour les arbres fruitiers sur la région de Djelfa sont présentées sur le tableau 21.

Tableau 21 : Efficacité d'utilisation de l'eau des arbres fruitiers dans la wilaya de Djelfa.

Cultures	Rdt. (q/ha)	Eff. kg/m ³
Olivier	9	0,09
Espèces à pépins	72	0,44
Espèces à noyaux	48	0,43

Pour l'olivier, l'efficacité d'utilisation de l'eau est de $0,09 \text{ kg/m}^3$, ce qui fait qu'il faut un volume d'eau de $11,1 \text{ m}^3$ pour produire un kg d'olive en irriguée. Ce qui est reste faible par rapport à la moyenne mondiale qui est de $0,33 \text{ kg/m}^3$ (un kg d'olive nécessite 3 m^3 d'eau).

A titre indicatif, dans la wilaya de Bejaia où l'oléiculture n'est pas irriguée, la production d'un kg d'olive nécessite un volume d'eau moyen de $5,2 \text{ m}^3$ (Mokhtari et Mostefai, 2013).

Dans la zone d'étude, le rendement de l'huile d'olive est de l'ordre de 9,4 litres par quintal. Ainsi, la production un litre de l'huile d'olive nécessite un volume d'eau moyen de 118 m³, ce qui est faible par rapport à la région de Bejaia où cette valeur est estimée à 54,7 m³/l (Mokhtari et Mostefai, 2013) et la moyenne mondiale de 15 m³/l. Ainsi, il semble que l'oléiculture s'adapte moins avec les conditions de la wilaya.

Dans les nouveaux vergers sud (El oued, Biskra...), et ceux de l'ouest où l'oléiculture est destinée à la production de l'olive de table (Mascara, Relizane, Mostaganem etc.) la production obéit à une approche extensive par l'augmentation du nombre de plants par unité de surface, ceci dans des superficies limitées ce qui exige plus d'eau d'irrigation et d'intrants afin d'améliorer les rendements

En ce qui concerne les espèces à pépins, le rendement moyen estimé dans la wilaya de Djelfa est de 72 quintaux par hectare. A titre indicatif Le rendement moyen des espèces à pépins est estimé dans la wilaya de Tipaza entre 60 et 80 quintaux par hectare et par an.

L'efficience d'utilisation de l'eau des espèces à pépins dans la zone d'étude est évaluée à 0,44 kg/m³. Ce qui signifie que la production d'un kg des espèces à pépins nécessite un volume d'eau de 2,3 m³. Cette valeur est proche de celle des espèces à noyaux (0,43 kg/m³).

6.4. Les cultures maraîchères

Les valeurs de l'efficience d'utilisation de l'eau des principales cultures maraîchères pratiquées dans la wilaya de Djelfa sont présentées dans le tableau 22, elles permettent de distinguer les cultures maraîchères les plus valorisantes en eau.

Tableau 22 : Efficience d'utilisation de l'eau des cultures maraichères dans la wilaya de Djelfa.

Cultures	Rdt (q/ha)	Eff (kg/m ³)
Oignon, ail	252	3,85
Laitue	118	3,42
Navets	93	2,7
Carottes	113	1,97
Pomme de terre	135	1,9
Melon, pastèque	109	1,49
Courgettes, concombre	83	1,47
Tomates	97	1,07
Poivron, piment	62	0,8

D'après nos résultats, on constate que la culture de l'oignon et ail présente une l'efficience d'utilisation de l'eau la plus élevée dans le secteur des cultures maraichères de qui est de 3,8 kg/m³. Cette valeur reste inférieure à la moyenne en Algérie estimée à 4,6 kg/m³ (Chapagain et Hoekstra, 2004) et la moyenne mondiale qui est de 3,6 kg/m³.

L'efficience d'utilisation de l'eau la plus faible est celle de la culture du poivron et piments qui est de 0,8 kg/m³, cette valeur est aussi très faible par rapport à la moyenne nationale qui est de 2,9 kg/m³ et la moyenne mondiale 2,6 kg/m³.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a permis l'estimation des besoins en eau virtuelle des principales cultures dans la wilaya de Djelfa située dans les Hauts plateaux centre à dominante steppique qui se caractérise par la prédominance du pastoralisme constituant la principale activité économique de la région.

Selon nos résultats, le volume total d'eau virtuelle en moyenne pour couvrir les besoins des cultures de la wilaya de Djelfa est de 244,1 H m³ d'eau (année normale) pour une superficie cultivée de 56118 hectares (parcours non compris), ce qui est nettement supérieur par rapport au volume alloué à l'irrigation qui est selon l'ANRH, évalué à 74 H m³ ce qui couvre seulement 33% des exigences en eau

La moyenne interannuelle des précipitations est de 327 mm au chef-lieu de la wilaya avec une variabilité interannuelle qui est très marquée, d'allant de 243 mm pour une année sèche à 407 mm pour une année humide. Ainsi le volume d'eau consommé par les cultures varie de 242,6 Hm³ pour une année humide, 224,1 Hm³ pour une année normale et 205 Hm³ pour une année sèche, soit une différence de 37,6 Mm³ entre une année humide et une année sèche.

Le secteur le plus exigeant en eau dans la région est celui de l'arboriculture fruitière qui consomme un volume de 101,1 Hm³ d'eau virtuelle par an suivi par les céréales avec 83,1 Hm³, vient après le maraîchage avec 33,4 Hm³. Alors que les cultures fourragères (Orge et avoine en vert) sont les moins exigeantes avec 6,5 Hm³ par an.

Il convient également de souligner l'intérêt de distinguer l'eau verte et l'eau bleue dont les implications financières et économiques différentes, bien qu'elles soient physiquement dépendantes l'une de l'autre. La mobilisation du concept d'eau virtuelle renvoie ainsi au débat sur la répartition entre agriculture pluviale et agriculture irriguée.

Les parcours couvrent une superficie très importante de l'ordre de 2 122 428 ha représentant 65,8% de la superficie totale de la wilaya reçoivent un volume d'eau verte (pluie efficace) de l'ordre 2,39 milliards de m³ par an.

Les céréales irriguées représentent 6,8% de la superficie céréalière totale avec un rendement moyen de l'ordre de 21 quintaux par hectare ce qui donne une efficacité d'utilisation de l'eau de 0,4 kg/m³ ou bien la volume d'eau nécessaire pour produire un kg de céréales est de 2,4 m³. Sachant que l'efficacité d'utilisation de l'eau des céréales conduite en

pluviale est de $0,25 \text{ kg/m}^3$, ce qui fait que pour produire un kilogramme de céréale conduite en pluviale il faudrait 4 m^3 d'eau verte.

De ce fait, le recours à l'irrigation sous toutes ses formes (intégrale ou de complément) s'avère nécessaire pour une production agricole en mesure de couvrir les besoins alimentaire de la population, particulièrement pour les produits de large consommation.

L'utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation (eau bleue) est conditionnée par la maîtrise des bases fondamentales de l'irrigation et le choix de systèmes d'irrigation économiseurs d'eau, comme l'aspersion sous toutes ses formes et l'irrigation localisée ou goutte à goutte.

Néanmoins, il s'agira pour nous d'essayer de faire une meilleure gestion de notre culture pluviale, par un respect rigoureux des différentes opérations de l'itinéraire technique de la culture qui permet de tirer profit des précipitations (eau verte) sans grand investissement et de réserver le peu d'eau bleue dont nous disposons aux cultures irriguées intégralement ou en complément en essayant de valoriser au mieux le mètre cube d'irrigation.

Ainsi, on peut dire que le concept d'eau virtuelle permet d'alimenter des réflexions sur les stratégies de gestion des ressources en eau ainsi que sur celles de la sécurité alimentaire et commerciale.

La valeur de l'eau utilisée pour produire certaines denrées alimentaires stratégiques (telles que le blé ou le riz) dans des pays affectés par des pénuries d'eau finit par être supérieure à la valeur des produits. En important des produits bon marché, ces pays peuvent réduire les tensions exercées sur leurs propres ressources en eau. Cependant, le commerce de l'eau virtuelle peut aussi créer des situations de forte dépendance en termes économiques et politiques des échanges mondiaux. De plus, même dans les pays où les ressources en eau sont abondantes, les exportations d'eau virtuelle ne sont pas sans conséquences sur l'environnement (cas actuellement dans l'ouest des États-Unis).

Compte tenu de la multiplicité des niveaux de gestion et de décision en termes de répartition de ressources en eau, l'eau virtuelle peut constituer un outil éclairant les termes des débats et les négociations aux différents niveaux de définition et de mise en œuvre des politiques sectorielles qui influent sur les usages de l'eau.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Allan J.A., 1997. Virtual water: a long term solution for water short Middle Eastern economies? Roger Stevens Lecture Theatre.University of Leeds. Water and Development Session. 21 p.

Allan J.A., 1993. Fortunately there are substitutes for water Otherwise our hydro-political futures would be impossible. In priorities for water resources allocation and management. ODA. London. United Kingdom. pp.13-26.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome. 326 p.

ANAT, 2003. Prospective territoriale pour un développement durable et intègre dans la wilaya de Djelfa. 183 p.

ANRH, 2012. Volume d'eau mobilise à travers la wilaya de Djelfa. 2 p.

Benblidia M., 2011. L'efficience d'utilisation de l'eau et approche économique. Plan Bleu Centre d'Activités Régionales. Sophia Antipolis. 56 p.

Benblidia M., Thivet G., 2010. Les Notes d'analyse du CIHEAM. Gestion des ressources en eau : Les limites d'une politique de l'offre. N. 58. 15 p.

Benfares D., Potin C., 2010. Réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau. Demande en eau Agricole. Algérie. 105 p.

Bouaziz A., Belabbes K., 2002. Efficience productive de l'eau en irrigue au Maroc. Revue HTE. N. 124. pp. 57-74.

Boukhari S., Djebbar Y., Abida H., 2008. Prix des services de l'eau en Algérie. Un outil de gestion durable. Communication. Congrès Mondial de l'Eau, 13. Montpellier. 8 p.

CDFD, 2007. Carte d'occupation des sols dans wilaya de Djelfa.

Chaoui W., Mouhouche M., 2006. Détermination des besoins en eau des cultures irriguées dans la wilaya de Blida à l'aide du logiciel Cropwat 4,3. Cas de périmètre de la Mitidja Ouest. Mém. Ing. ENSA, Alger. 87 p.

Chapagain A. K., Hoekstra A. Y., 2004. Water footprints of nations. Value of Water. Research Report Series. UNESCO-IHE. Delft. The Netherlands. N.16. 76 p.

CNES, 2008. Résultats globaux du rapport national sur le développement humain. National Economique et Social, Alger.

Deluzarche C., 2005. L'eau virtuelle. L'empreinte sur l'eau de quelques pays (www.waterfootprint.org).

Demmak A., 2010. Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau. Les ressources en eau superficielle. Etude des volumes régularisables, Algérie. 108 p.

- Djebbar Y., 2010.** Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau. Les ressources en eaux non conventionnelles. 84 p.
- Doorenbos J., Kassam A.H., 1979.** Réponse des rendements à l'eau, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 33. Rome. 234 p.
- Doorenbos J., Pruitt W. O., 1975.** Les besoins en eau des cultures, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 24. Rome.
- DPAT, 2010.** Monographie de la wilaya de Djelfa. Vol.1. 211 p.
- DSA, 2012.** Rapport des statistiques agricoles de la wilaya de Djelfa.
- FAO, 2005.** L'irrigation en Afrique en chiffres. Enquête AQUASTAT. Algérie. 12 p.
- FAO, 2009.** Cropwat 8.0. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html.
- Fernandez S., 2007.** L'eau virtuelle en Méditerranée : un indicateur pour contribuer à l'analyse des questions de gestion et de répartition de l'eau en situation de pénurie? ENGREF. Centre de Montpellier. 92 p.
- Fernandez S., Thivet G., 2008.** Les notes du plan bleu : L'eau virtuelle, quel éclairage pour la gestion et la répartition de l'eau en méditerranée ? N.8. 4 p.
- Fernandez S., 2007.** Eau virtuelle et sécurité alimentaire, ch.10 du Traité d'irrigation 2ème édition, Lavoisier. pp. 919 – 930.
- Fernandez S., Verdier J., 2004.** Problématique de l'eau en méditerranée. Atelier international de l'IME. IPTRID. Montpellier. 20 p.
- Gnehm F., 2012.** Etude de l'empreinte hydrique suisse. Illustration de la dépendance de la Suisse à l'égard de l'eau. 35 p.
- Hoekstra A.Y., 2003.** Virtual water: An Introduction In Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Value of water research report series Delft. The Netherlands. UNESCO-IHE. N.12, 248 p.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q., 2002.** Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Series Delft. the Netherlands. UNESCO-IHE. N. 11. 120 p.
- IDOM, 2005.** Document IV. Etude géologique et édaphologique. Gestion intégrée des ressources en eau dans la région des hauts plateaux. 195 p.
- IDOM, 2005.** Document VI. Le secteur agricole des hauts plateaux. Gestion intégrée des ressources en eau dans la région des Hauts Plateaux. 60 p.
- Kettab A., 2001.** Les ressources en eau en Algérie : stratégies, enjeux et vision, Elsevier Science Desalination, Alger. Algérie. pp. 25 – 33.

- Khaldi A., 2005.** Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien « Monts de Tlemcen – Saida ». Thèse de doctorat. Univ. d'Oran. 229 p.
- Lani S., 2011.** Importance stratégique de l'eau virtuelle des céréales en Algérie. Thèse de Magister. ENSA. Alger. 76 p.
- Lehtihet L., 2012.** Mobilisation des ressources en eaux en Algérie. Stratégie du Secteur de l'Eau. WADIS-MAR. ANRH. 31 p.
- Loucif S., 2003.** Les ressources en eau et leurs utilisations dans le secteur agricole en Algérie. Revue HTE. N.125. pp. 94 - 101.
- MADR, 2007.** Statistiques agricoles, commerce extérieur agricole.
- MATE, 2001.** Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques. Communication nationale initiale. 150 p.
- Mebarki A., 2010.** La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien. Mobilisation et gestion durable des ressources. 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions. 19 p.
- Mehdid A., 2010.** Réalisation de l'étude d'actualisation du plan national de l'eau. Les ressources en eau souterraine. Algérie. 121 p.
- Mokhtari S., 2011.** Calcul de l'eau virtuelle agricole de la wilaya de M'sila en vue de la détermination de l'efficacité d'utilisation de l'eau. Thèse de magister. ENSA. Alger. 87 p.
- Mokhtari R., Mostefai S., 2013.** Détermination de l'efficacité d'utilisation de l'eau de l'olivier en Algérie. Mém. Ing. ENSA. Alger. 42 p.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y., 2010.** The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Value of Water Research Series Delft. The Netherlands UNESCO-IHE. N. 47.
- Mouhouche B., 2008.** Etude en vue d'une utilisation durable et efficace des ressources hydriques en Algérie. Colloque international sur « L'ARIDOCULTURE ». Optimisation des productions agricoles et développement durable. CRSTRA. Biskra.
- Mouhouche B., 2010.** Module de techniques d'irrigation. 220 p.
- Mouhouche B., Guemraoui M., 2004.** Réhabilitation des grands périmètres d'irrigation en Algérie. Modernisation de l'Agriculture Irriguée. Projet INCO-WADEMED. Rabat. 13 p.
- Oki T., Kanae S., 2004.** Virtual water trade and world water resources. Water science and technology. Vol. 49. N.7. pp 203 – 209.
- Ollier CH., Poirée M., 1983.** Irrigation : les réseaux d'irrigation théorique. Techniques et économie des arrosages. 7^{ème} édition. Eyrolles. Paris. 503 p.

- Parveen S., Faisal I.M., 2004.** Trading virtual water between India and Bangladesh: a politico-economic dilemma. *Water policy*, Vol. 6. N.6.
- PNE, 2011.** Réalisation de l'étude d'actualisation du Plan National de l'Eau. Adéquation Ressources et Demandes. Volet A. Rapport. 183 p.
- PNUD, 2009.** Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. 19 p.
- Rouissat B., 2009.** La gestion des ressources en eau en Algérie : Situation, défis et apport de l'approche systémique. Univ de Tlemcen. 15 p.
- Remini B., Leduc C., Hallouche W., 2009.** Evolution des grands barrages en régions arides. Quelques exemples algériens. *Sécheresse*. pp. 96-103.
- Renault D., 2003.** Value of virtual water in food: Principles and virtues, in *Virtual water trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series*. Delft, The Netherlands. UNESCO-IHE. N. 12.
- Roch L., Gendron C., 2005.** Le commerce de l'eau virtuelle : du concept à la politique. La pénurie d'eau. *Géocarrefour*. Vol. 80. N. 4. 13 p.
- Thouvenot T., 2012.** L'empreinte eau de la France. Rapport WWF. 38 p.
- Tiercelin J.R. 2006.** Traité de l'irrigation. 2^e édition. Lavoisier. Paris. 1266 p.
- Troy B., 2012.** Augmenter la productivité de l'eau : un objectif de développement agricole ? Paris. Note N. 2. 6 p.
- Tuzet A., Perrier A., 1998.** Les besoins en eau des cultures. *Traité d'irrigation*. Lavoisier. Paris. pp. 148 – 249.
- UNESCO, 2012.** Planète science. Bulletin trimestriel d'information sur les sciences exactes et naturelles. Vol. 10, N.2. 24 p.
- Van Laere P.E., 2003.** Mémento de l'irrigation. Collection « Manuels Techniques ». Belgique. 13 p.
- Yang H., Zehnder, A., 2002.** Water scarcity and food import: a case study for southern Mediterranean countries. *World development*. Vol. 30, N.8. pp. 1413 – 1430.

Annexes

Tableau 1: Besoins en eau d'irrigations (Année normale).

Culture	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Som.
Blé	1,9	19,8	68,4	114,9	170,2	108,6							484,1
Orge	7	38,8	85,4	93,5	22,4								247,1
Olivier			38,4	65,2	97,3	138,7	169,3	144,1	83,5	53,8	15,1		805,4
Poirier			31	87,1	140,3	190,9	229,3	183,5	25,5				887,6
Abricotier			33,4	87,8	132,2	181,2	192,7	42,4					669,7
Autres arbres			24,3	50,8	106,4	156,2	189,4	162,5	97,4	45,4			832,4
P. de terre			13,8	57,4	165,5	221,8	148,2						606,7
Carottes			41,3	95,5	150,7	180,4							467,9
Tomates					68,7	153,8	261,8	229,4	88,6				802,3
Oignons		14,6	72,9	104,5	149,9	177,6							519,5
Poivrons					68,6	145,4	239,5	206,7	27,8				688
Melon					37,4	149,7	241,9	191,9	22				642,9
Courgettes					70,1	158,5	226,4	42,8					497,8
Navets	14,3	2,5							45,1	64,6	41,1	25,3	192,9
Laitue				59,1	131,4	82,4							272,9
Autres C.M.					35,1	115,4	232,6	209,9	68,2				661,2
Parcours			20,1	66,1	98,6	140,2	98,6						423,6

Tableau 2 : Besoins en eau d'irrigations (Année sèche).

Culture	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Som.
Blé	5,6	26,7	75,1	121,9	177,8	113,3					3,1	2,9	526,4
Orge	14,3	45,8	92,2	100,5	27,8						0,2	1,5	282,3
Olivier			45	72,2	105	143,2	172,1	149,2	91,2	60	21,2		859,1
Poirier		4,1	37,7	94,3	148	195,6	232,1	188,7	27,9				928,4
Abricotier		4,1	40	94,9	139,9	185,6	195,4	43,8					703,7
Autre			31	57,8	114,2	160,7	192,1	167,6	105,1	50,6			879,1
P. de terre			17,2	64,5	173,1	226,5	149,9						631,2
Carottes			48,1	102,6	158,5	185,1							494,3
Tomates					76,3	158,4	264,5	234,5	93,7				827,4
Oignons		21,6	79,5	111,6	157,5	182,2							552,4
Poivrons					76,3	150	242,2	211,8	30,2				710,5
Melon					45,2	154,2	244,7	197	24,4				665,5
Courgettes					77,7	163	229,2	44,3					514,2
Navets	22,4	4,9							52,8	70,8	48,3	31,8	231
Laitue				66,1	139,1	85							290,2
Autre					42,9	120	235,3	215,1	73,3				686,6
Parcours			25,5	73,1	106,4	144,8	100,4						450,2

Tableau 3 : Besoins en eau d'irrigation (Année humide).

Culture	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Som.
Blé		13,2	62	108,2	162,8	104,5							450,7
Orge	4,3	32,3	79,1	86,7	17,3								219,7
Olivier			31,9	58,3	89,8	134,5	166,7	139,3	76,3	48	9,5		754,3
Poirier			24,6	80,4	132,9	186,7	226,7	178,7	23,2				853,2
Abricotier			27	81,1	124,8	177	190,1	41					641
Autre arbre			18	44,1	99,1	152	186,8	157,6	90,1	40,6			788,3
P. de terre			10,6	50,7	158	217,7	146,6						583,6
Carottes			35	88,9	143,3	176,2							443,4
Tomates					61,2	149,7	259,1	224,7	83,7				778,4
Oignons		8,1	66,4	97,8	142,4	173,4							488,1
Poivrons					61,2	141,3	237	201,9	25,5				666,9
Melon					30	145,5	239,4	187,2	19,8				621,9
Courgettes					62,6	154,3	223,8	41,5					482,2
Navets	6,5	0,2							38	58,9	34,3	19,2	157,1
Laitue				52,3	123,9	80							256,2
Autre C.M.					27,7	111,2	230	205,1	63,3				637,3
Parcours			15,7	59,4	91,2	136	97,1						399,4

Tableau 1 : Eau verte, eau bleue par culture (Année normale).

Culture	Surf (ha)	P eff (mm)	Eau verte (m³)	BI (mm)	Eau bleue (m³)	Eau virtuelle (m³)
Blé Irr	716,7	223,4	1 601 040,8	484,1	3 469 399,5	5 070 440,3
Orge Irr	1 839,7	195,4	3 594 715,2	247,1	4 545 824,6	8 140 539,8
Blé Sec.	6 683,3	223,4	14 930 559,2	0,0	0,0	14 930 566,7
Orge Sec.	28 137,7	195,4	54 981 007,2	0,0	0,0	54 981 000,7
Olivier	3 384,0	219,0	7 410 960,0	805,4	27 254 736,0	34 665 696,0
Poirier	3 302,6	174,2	5 753 129,2	887,6	29 313 877,6	35 067 006,8
Abricotier	2 538,3	151,1	3 835 416,6	669,7	16 999 196,0	20 834 612,6
Autres	1 038,5	190,5	1 978 399,7	832,4	8 644 723,7	10 623 123,4
Pomme de T.	1 261,1	101,4	1 278 755,4	606,7	7 651 093,7	8 929 849,1
Carottes	636,2	105,6	671 795,5	467,9	2 976 639,4	3 648 435,0
Tomates	225,6	104,5	235 783,4	802,3	1 810 229,5	2 046 012,8
Oignons	1 388,0	134,9	1 872 371,5	519,5	7 210 504,2	9 082 875,7
Poivrons	224,2	88,5	198 390,5	688,0	1 542 289,6	1 740 680,1
Melon	362,6	88,5	320 927,6	642,9	2 331 348,3	2 652 275,8
Courgettes	288,4	65,7	189 498,5	497,8	1 435 804,5	1 625 303,1
Navets	232,4	152,5	354 455,8	192,9	448 357,5	802 813,2
Laitue	274,4	70,6	193 747,6	272,9	748 919,5	942 667,1
Autres	253,9	99,2	251 868,8	661,2	1 678 786,8	1 930 655,6
Parcours	2 122 428,0	112,8	2 394 098 784,0	423,6	8 990 605 008,0	11 384 703 792

Tableau 2 : Eau verte, eau bleue par culture (Sèche).

Culture	Surf.(ha)	P eff.(mm)	Eau verte (m ³)	BI (mm)	Eau bleue (m ³)	Eau virtuelle (m ³)
Blé Irr	716,67	168,7	1209022,29	526,4	3772550,88	4981573,17
Orge Irr	1839,67	147,6	2715352,92	282,3	5193388,41	7908741,33
Blé Sec.	6683,33	168,7	11274777,7	0	0	11274777,7
Orge Sec.	28137,67	147,6	41531200,9	0	0	41531200,9
Olivier	3384	165	5583600	859,1	29071944	34655544
Poirier	3302,6	131,2	4333011,2	928,4	30661338,4	34994349,6
Abricotier	2538,33	113,9	2891157,87	703,7	17862228,2	20753386,1
Autres	1038,53	143,5	1490290,55	879,1	9129717,23	10620007,8
Pomme de terre	1261,1	76,7	967263,7	631,2	7960063,2	8927326,9
Carottes	636,17	79,9	508299,83	494,3	3144588,31	3652888,14
Tomates	225,63	78,6	177345,18	827,4	1866862,62	2044207,8
Oignons	1387,97	101,9	1414341,43	552,4	7667146,28	9081487,71
Poivrons	224,17	66,5	149073,05	710,5	1592727,85	1741800,9
Melon	362,63	66,5	241148,95	665,5	2413302,65	2654451,6
Courgettes	288,43	49,5	142772,85	514,2	1483107,06	1625879,91
Navets	232,43	115	267294,5	231	536913,3	804207,8
Laitue	274,43	53,6	147094,48	290,2	796395,86	943490,34
Autres	253,9	74,6	189409,4	686,6	1743277,4	1932686,8
Parcours	2122428	85,3	1810431084	450,2	9555170856	1,1366E+10

Tableau 3 : Eau verte, eau bleue par culture (humide).

Culture	Surf.(ha)	P eff.(mm)	Eau verte (m ³)	BI (mm)	Eau bleue (m ³)	Eau virtuelle (m ³)
Blé Irr	716,7	274,9	1 970 125,8	450,7	3 230 031,7	5 200 157,5
Orge Irr	1 839,7	240,4	4 422 566,7	219,7	4 041 755,0	8 464 321,7
Blé Sec.	6 683,3	274,9	18 372 474,2	0	0	18 372 474,2
Orge Sec.	28 137,7	240,4	67 642 958,7	0	0	67 642 958,7
Olivier	3 384,0	269,6	9 123 264,0	754,3	25 525 512,0	34 648 776,0
Poirier	3 302,6	214,4	7 080 774,4	853,2	28 177 783,2	35 258 557,6
Abricotier	2 538,3	185,9	4 718 755,5	641,0	16 270 695,3	20 989 450,8
Autres	1 038,5	234,5	2 435 352,9	788,3	8 186 732,0	10 622 084,8
Pomme de terre	1 261,1	124,8	1 573 852,8	583,6	7 359 779,6	8 933 632,4
Carottes	636,2	130,1	827 657,2	443,4	2 820 777,8	3 648 435,0
Tomates	225,6	128,8	290 611,4	778,4	1 756 303,9	2 046 915,4
Oignons	1 388,0	166,0	2 304 030,2	488,1	6 774 681,6	9 078 711,8
Poivrons	224,2	109,1	244 569,5	666,9	1 494 989,7	1 739 559,2
Melon	362,6	109,1	395 629,3	621,9	2 255 196,0	2 650 825,3
Courgettes	288,4	81,0	233 628,3	482,2	1 390 809,5	1 624 437,8
Navets	232,4	187,7	436 271,1	157,1	365 147,5	801 418,6
Laitue	274,4	87,1	239 028,5	256,2	703 089,7	942 118,2
Autres	253,9	122,2	310 265,8	637,3	1 618 104,7	1 928 370,5
Parcours	2 122 428,0	138,9	2 948 052 492,0	399,4	8 476 977 432,0	11 425 029 924,0

Résumé

L'objectif de ce travail est de déterminer l'eau virtuelle des principales cultures pratiquées dans la wilaya de Djelfa et son efficacité d'utilisation (EUE). Ce qui est indispensable pour approcher la demande et mieux l'intégrer avec l'offre dans la région.

Dans le cas de la production agricole, l'eau virtuelle est le volume d'eau évapotranspirée par les cultures. Elle dépend en particulier du savoir faire de ses producteurs et de sa zone climatique de production, les climats chauds et secs induisent les plus fortes consommations.

A l'échelle de la wilaya, la détermination des quantités d'eau virtuelles se fait par le calcul des besoins en eau unitaires relatifs à l'hectare irrigué et des pluies totales sur la culture envisagée à l'aide du logiciel Cropwat 8.0 de la FAO.

La quantification des volumes d'eau virtuelle agricole des cultures pratiquées dans la zone d'étude met en évidence l'importance quantitative de ces volumes d'eau au regard des ressources en eau disponibles dans la wilaya, ainsi que l'intérêt que peut présenter le concept d'eau virtuelle comme outil d'analyse et d'aide à la décision en matière de gestion et de répartition de l'eau en situation de pénurie.

Mots clés : Eau virtuelle, Efficacité d'utilisation de l'eau, besoins en eau, Wilaya de Djelfa.

Summary

The objective of this work is to determine the virtual water of main crops grown in the province of Djelfa and water use efficiency (WUE). Which is essential to approach the application and better integration with the offer in the region.

In the case of agricultural production, virtual water is the volume of water evapotranspired by crops. It depends in particular on the expertise of its producers and its global production area, warm and dry climates induce higher consumption.

At the scale of the province, the determination of the quantities of virtual water is done by calculating the unit water requirements related to water irrigated hectare and total rainfall over the crop using the Cropwat 8.0 FAO software.

Quantifying the volume of agricultural virtual water of crops practiced in the study area demonstrates the quantitative importance of these volumes of water in terms of available water resources in the province, so the advantages which can be the concept of virtual water as an analysis tool and decision support for the management and distribution of water in scarcity situation.

Key words : virtual water, Water use efficiency, water requirements , Djelfa.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحديد المياه الافتراضية للمحاصيل الرئيسية التي تزرع في منطقة الجلفة وفعالية استخدام المياه، وهو أمر ضروري لتقريب ودمج بشكل أفضل مع موارد المنطقة.

في حالة الإنتاج الزراعي، المياه الافتراضية هي كمية مياه النتج والتبخر من قبل المحاصيل. ذلك يعتمد بصفة خاصة على خبرة المنتجين ومنطقة الإنتاج ، المناخات الحارة والجافة تحث على زيادة استهلاك.

في نطاق الولاية، تم تحديد كميات المياه الافتراضية عن طريق حساب احتياجات المياه المتعلقة بالوحدة للهكتار المرورية بالمياه ومجموع التساقط على المحصول إلى استخدام برامج Cropwat 8.0 FAO.

قياس حجم المياه الافتراضية الزراعية لمحاصيل منطقة الدراسة تسلط الضوء على أهمية لهذه الكميات من المياه من حيث الموارد المائية المتاحة في الولاية ، وبالتالي فإن جميع المزايا التي يمكن أن تكون في مفهوم المياه الافتراضية اعتبارها أداة تحليل ودعم اتخاذ القرارات لإدارة وتوزيع المياه في ظروف الندرة.

الكلمات المفتاح : المياه الافتراضية، فعالية استعمال المياه، المياه احتياجات المياه، ولاية الجلفة .