

Comparative Study of the virtual water consumed by cereals in different bioclimatic areas of Tunisia

Etude comparative de l'eau virtuelle consommée par les céréales dans les différentes zones bioclimatiques de la Tunisie

R. HAMMAMI¹, T. STAMBOULI², A. FRIJA³, A. SOUISSI², A. BENALAYA²

¹ Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, Rue Hédi Karray, 2049 Ariana-Tunisie.

² Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne, 1121 Mograne. Tunisia.

³ International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Amman, Jordanie

*Corresponding author: stamboulitalel@yahoo.fr

Abstract - This study aims the evaluation of the virtual water consumed by rainfed cereals and under complementary irrigation regimes in Tunisia with a sample of 150 farms. The main objective of this paper is to provide the necessary information for the policies formulations that integrate the concept of virtual water into the food security strategy in Tunisia, as well as to a better understanding of the role of farmers in the environment and water management. The methodology adopted is based on the estimation of the virtual water consumed by crops and on the calculation of some economic indicators such as the economic profitability of virtual water while being based on a typology of holdings per area stratum. Results show, the importance of complementary irrigation in reducing the quantity of virtual water consumed by cereals and, the need for a practical management of irrigation which will increase yields in the productive cereal regions and a better saving of water by adopting irrigation schedules according to the vegetative cycle of the plant and the climatic requirements.

Keywords: Cereals, Virtual Water, Irrigation, Tunisia

Résumé - Cette étude vise l'évaluation de l'eau virtuelle consommée par les céréales conduites en pluvial et sous régime d'irrigation complémentaire dans toute la Tunisie auprès d'un échantillon de 150 exploitations. L'objectif principal de ce travail est d'apporter les éclairages nécessaires à la formulation des politiques qui intègrent le concept d'eau virtuelle dans la stratégie de sécurité alimentaire en Tunisie, ainsi de mieux comprendre le rôle des agriculteurs dans la gestion de l'eau. La méthodologie adoptée repose sur l'estimation de l'eau virtuelle consommée par les cultures et sur le calcul de quelques indicateurs économiques comme la rentabilité économique de l'eau virtuelle tout en se basant sur une typologie des exploitations par strate de superficie. Les résultats montrent d'une part, l'importance de l'irrigation complémentaire dans la réduction de la quantité d'eau virtuelle consommée par les céréales et d'autre part, la nécessité d'une gestion pratique de l'irrigation qui permettra à la fois un accroissement des rendements dans les régions productives des céréales et une meilleure économie de l'eau en adoptant des calendriers d'irrigation selon le cycle végétatif de la plante et les exigences climatiques.

Mots clés: Céréales, Eau virtuelle, Irrigation, Tunisie

1. Introduction

Les céréales représentent depuis des millénaires, une activité économique et sociale stratégique et de premier plan en Tunisie. Elles représentent des produits de base qui constituent la majeure partie de la ration alimentaire du citoyen tunisien, elles lui procurent 54% des calories et 64% des protéines. La consommation par tête d'habitant et par an est d'environ 181 Kg équivalent céréales dont 51% de blé dur et 41% de blé tendre. Les céréales représentent en moyenne 16% des dépenses alimentaires et environ 6% des dépenses globales du tunisien (Bachta, 2011). Elles ont toujours occupé des grandes superficies et demeurent encore la principale ressource vivrière du tunisien. Par l'importance des superficies occupées et par son poids dans la sécurité alimentaire du pays, le sous-secteur céréalier

demeure un des plus importants du secteur de la production agricole en Tunisie (Slama et al., 2005; Bachta, 2011; El Felah et Gharbi, 2014). Les emblavures réservées aux céréales (blé dur, blé tendre, orge et triticale) sont en moyenne de 1,5 million d'hectares. Le blé dur occupe à lui seul, aux environs de 850.000 hectares. L'orge est emblavée sur un demi-million d'hectares et le blé tendre à un degré moindre, 150.000 hectares (El Felah et Gharbi, 2014). En effet, la production céréalière est marquée par une fluctuation interannuelle en fonction du climat ce qui entraîne une oscillation du niveau d'autosuffisance; il est entre 16% pour une année de faible production et 60% pour une année de forte production (Hamdane, 2013). La céréaliculture enregistre un taux de couverture en régression continue qui se traduit par des déficits de plus en plus élevés qui sont passés respectivement de 5% à 23% pour le blé dur, de 58% à 76% pour le blé tendre et de 6% à 46% pour l'orge entre les périodes 1971-1975 et 2001-2005. Cette situation devient aujourd'hui plus préoccupante vue le poids de l'importation des produits céréaliers: sur deux kilogrammes de céréales consommés, un provient de la production nationale et l'autre de l'importation, ou encore sur quatre baguettes consommées, seule une est produite à partir de blé local et les trois autres sont fabriquées à partir de blé importé. En 2011, les importations de blé ont atteint presque 2 millions de tonnes (FAOSTAT, 2013). En Tunisie, la production de céréales est confrontée à plusieurs contraintes biotiques et abiotiques d'ordres pédologiques et/ou climatiques. Parmi ces contraintes, le stress hydrique est considéré comme le facteur le plus important limitant la production des céréales. La sécheresse est l'un des tous premiers facteurs qui entraîne des différences non seulement entre les rendements moyens et potentiels mais aussi entre les différentes campagnes céréalières (Slama et al., 2005). La pénurie en eau s'accroît au fil des années où la baisse des ressources souterraines pourrait atteindre jusqu'à 28% dans les trois décennies à venir (El Felah et Gharbi, 2014). Cela aurait des retombées socio-économiques à l'égard des ressources hydrauliques. Une telle situation pose une véritable problématique pour l'avenir de ce secteur céréalier. Chahed et Besbes (2005) ont affirmé que le rôle de l'agriculture irriguée dans les pays arides et semi-arides apparaît comme salutaire: en permettant l'accroissement et la stabilisation de la production agricole et joue de ce fait un rôle déterminant dans les politiques de développement. Les services du ministère de l'agriculture chargés de la production végétale sont très conscients de ce potentiel et font beaucoup d'effort pour amener les agriculteurs des périmètres irrigués à introduire les céréales dans leurs assolements. En effet, une stratégie du développement du secteur des céréales proposée par le ministère de l'agriculture en 2009 arrête parmi les objectifs spécifiques pour l'horizon 2016 d'irriguer 125 000 ha de céréales en 2014 et 130 000 ha en 2016. La gestion de la demande de la céréaliculture en eau verte et bleu constitue un axe principal de la politique générale des ressources hydriques dans le futur, afin de maîtriser la consommation. Alors une nouvelle stratégie devrait s'imposer, axée à la fois sur la préservation des ressources en eau et le garant de la sécurité alimentaire. Cette stratégie repose principalement sur ce que l'on appelle «l'eau virtuelle». Le concept s'est retrouvé, pendant cette décennie, au cœur des discussions sur le commerce alimentaire mondial, apportant une dimension nouvelle au débat sur la gestion des réserves en eau. L'idée fut développée par Allan (1993) comme le volume d'eau incorporé dans les cultures alimentaires qui sont échangées à l'échelle internationale. Des échanges d'eau virtuelle contre une pénurie réelle, l'idée est relativement simple: nous savons tous que l'eau est nécessaire pour produire des aliments tels que les céréales. Donc l'eau virtuelle est le volume d'eau utilisé dans le processus de production et elle est «virtuelle» parce qu'elle n'est plus présente dans la marchandise. Par exemple pour produire 1 kg de blé, il faut environ 1000 litres d'eau. Si un pays exporte vers un autre pays une denrée dont la production nécessite beaucoup d'eau, cela revient à exporter de l'eau sous une forme virtuelle. Cet échange virtuel est égal à la quantité d'eau virtuelle contenue dans le produit, multipliée par la quantité du produit vendu. Cela signifie pour le pays importateur qu'il n'a pas besoin d'utiliser cette quantité d'eau pour produire lui-même cette marchandise. S'il est déjà confronté à des problèmes de pénurie d'eau, l'opération se traduit par de réelles économies d'eau et allège la pression sur ses ressources hydriques. En effet, Allan (1993) a utilisé ce concept pour décrire les opportunités d'une nation peu abondante en eau à atteindre la sécurité alimentaire en achetant une portion de ses besoins alimentaires du marché international au lieu d'utiliser ses ressources rares en eau dans la production de tous ses besoins alimentaires. D'après l'UNESCO (Hoekstra et Hung, 2002), les échanges de produits agricoles constituent 67% du commerce de l'eau virtuelle. En effet, l'agriculture est la première utilisatrice d'eau: 70 % de l'eau disponible sur terre sert à l'irrigation des champs. Parmi les céréales, le blé est le premier produit échangé (30% du volume total des échanges d'eau virtuelle) suivi par le soja 17% et le riz 15%.

L'estimation des flux d'eau virtuelle se fonde sur le concept de DSE ($m^3/tonnes$), défini comme le ratio entre les besoins spécifiques en eau (m^3/ha) et les rendements ($tonne/ha$), par culture et par pays. Les volumes d'eau importés par le biais du commerce du blé sont obtenus par le produit des volumes de blé importés et de leur contenu en eau. Pour un produit agricole l'eau virtuelle représente l'eau évapotranspirée par les cultures. Elle se présente sous deux formes «l'eau verte» provenant des précipitations et trouvée naturellement dans le sol et «l'eau bleue» ou eau d'irrigation (Siebert et al, 2010 et Hoekstra et al, 2005). La disponibilité de l'eau verte dépend principalement des conditions climatiques ainsi que les aménagements établis pour recueillir les eaux de pluie. Alors que l'eau bleue qui s'agit surtout des eaux souterraines dépend indirectement des conditions climatiques. Selon Fernandez (2007) le concept d'eau virtuelle est souple et dont le choix de la méthode de calcul et les valeurs trouvées dépendent de l'échelle d'étude et du phénomène que l'on veut mettre en évidence. Plusieurs travaux de recherches se sont intéressés à l'estimation de l'eau virtuelle (Zhao et Samson, 2012; Dominguez, 2010) et à l'étude de son importance dans l'atteinte des objectifs de sécurité alimentaire tout en mettant ce concept dans son contexte international d'importation et d'exportation des produits agro-alimentaires. Plusieurs chercheurs (Wichelns (2001); Hoekstra et Hung (2002); Zhan-Ming, Chen (2013); Zhang et Anadon, (2014)) prouvent l'importance de prendre en considération l'eau virtuelle dans les décisions à l'heure d'exporter des produits agro-alimentaires issus des systèmes intensifs. Ces études, précédemment citées, ont traité l'aspect général du concept de l'eau virtuelle. D'autres chercheurs ont étudié l'évaluation de l'eau virtuelle des céréales (Novo et al., 2009).

Le présent travail a pour objectifs :

- Elaboration des fiches technico-économiques représentatives par culture de céréale qui reflètent le niveau technique moyen pour la région nord et nord –ouest et pour chaque étage bioclimatique, ainsi que des estimations des "Marges Brutes » ;
- Estimation de l'eau virtuelle par hectare et par culture des céréales selon son importance dans la balance commerciale ;
- Etablissement d'un bilan hydrique (eau bleue, eau verte et eau virtuelle) des régions productrices des céréales en Tunisie.

2. Matériel et méthodes

La carte agricole régionale de la Tunisie, établie en 2003 par le Ministère de l'Agriculture, constitue un instrument de diagnostic, d'analyse et de prise de décision et permet d'avoir une vision globale sur l'espace agricole, ses ressources et ses potentialités. Parmi les données utilisées à partir de cette carte, nous citons la carte des étages bioclimatiques, des modèles d'exploitations, la pédologie, et celle des stations pluviométriques. En plus des cartes agricoles nous avons utilisé les statistiques de la DGEDA et de l'INS et celle des partenaires régionaux comme les CRDA (Commissariats Régionaux au Développement Agricole) ainsi que les partenaires régionaux.

3. Échantillonnage

Les exploitations, qui ont fait l'objet de la suivi, ont été choisies selon les caractéristiques de la zone d'étude et ont concerné les principaux gouvernorats ayant une superficie représentative des céréales qui sont Ariana, Ben Arous, Mannouba, Tunis, Zaghuan, Béja, Bizerte, Siliana, le Kef, Jendouba et Kairouan. En effet, les céréales sont les principales cultures en termes de superficie et production cultivées dans ces régions. La zone d'étude faisant partir des étages bioclimatiques suivants: humide subhumide (HSH), Semi aride supérieur (SAS), Semi aride inférieur (SAI) et aride supérieur (AS). Les échantillons ont été déterminés en tenant compte de l'étage bioclimatique, la taille de l'exploitation et le système de conduite (en pluvial et en irrigué).

4. Méthodes de travail

4.1. Estimation de différents paramètres

4.1.1. Estimation de l'eau virtuelle utilisée par une culture

Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes centrés sur l'eau d'irrigation gaspillée par les différentes cultures en Tunisie. Pour cela, nous devons connaître les besoins nécessaires pour obtenir la meilleure production pour une culture. Comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre, l'eau virtuelle correspond à la quantité totale d'eau utilisée par une culture durant sa saison végétative pour

donner des produits. Cette eau virtuelle est puisée du sol qui reçoit de la pluie et éventuellement de l'eau de l'irrigation, dans cette étude, son estimation est faite en trois étapes :

- L'estimation des stocks d'eau mensuels S_i dans les sols disponibles pour la culture ;
- L'estimation de l'évapotranspiration réelle mensuelles ETR_i de la culture ;
- L'estimation de l'eau virtuelle utilisée par unité de produit obtenu de la culture.

4.1.2. Estimation des stocks d'eau mensuels S_i dans le sol disponibles pour la culture

Le stock d'eau dans le sol S_i disponible à la fin de chaque mois i pour la culture est estimé en utilisant le système d'équation suivant :

$$S_i = \begin{cases} 0 & ; \quad siS_{i-1} + P\hat{u}_i + I_i - ETM_i \leq 0 \\ S_{i-1} + P\hat{u}_i + I_i - ETM_i & ; \quad si0 < S_{i-1} + P\hat{u}_i + I_i - ETM_i < RU \\ RU & ; \quad siS_{i-1} + P\hat{u}_i + I_i - ETM_i \end{cases}$$

Où

- $P\hat{u}_i$ est la pluie utile pour le mois i . $P\hat{u}_i = c P_i$; avec $c = 0.8$ et P_i : la pluie totale enregistrée durant le mois i ;
- ETM_i est l'évapotranspiration maximale mensuelle de la culture qui représente le besoin en eau mensuel de la culture durant le mois i . $ETM_i = K_{ci} ETP_i$. Avec :
- ETP_i : l'évapotranspiration potentielle (ou évapotranspiration de référence ET_0) durant mois i ;
- K_{ci} : le coefficient cultural de la culture au cours du mois i . Le cycle cultural peut être subdivisé en quatre stades de développement ; chaque stade se caractérise par sa propre valeur K_c :
 - 1^{er} stade** : Stade initial; c 'est la période qui s'étend du semis jusqu'à la couverture de la terre par la culture d'environ 10%;
 - 2^{ème} stade** : Stade de développement de la culture : cette période commence à la fin de l'étape initiale et dure jusqu'à ce que la pleine couverture au sol ait été atteinte (couverture de 70 à 80% de la terre) ; il ne signifie pas nécessairement que la récolte est à sa hauteur maximum;
 - 3^{ème} stade** : Stade de mi-saison: cette période commence à la fin de l'étape de développement de la culture et dure jusqu'à la maturité;
 - 4^{ème} stade** : Stade de fin saison ; cette période commence à la fin du 3^{ème} stade et dure jusqu'au dernier jour de la moisson, récolte, ou chute des feuilles; il inclut la maturation.
- I_i est la quantité d'eau d'irrigation apportée à la culture durant mois i . Dans le cas d'une culture pluviale, $I_i = 0$ puisque l'irrigation n'est appliquée.
- RU est la capacité d'emménagement en eau du sol (réserve utile) qui dépend de la nature du sol et la profondeur d'enracinement de la culture.

4.1.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle mensuelle ETR_i de la culture

L'évapotranspiration réelle mensuelle ETR_i de la culture au cours du mois i est estimée en utilisant le système d'équation :

$$ETR_i = \begin{cases} P\hat{u}_i + I_i + S_{i-1}siP\hat{u}_i + I_i + S_{i-1} < ETM_i \\ ETM_i siP\hat{u}_i + I_i + S_{i-1} \geq ETM_i \end{cases}$$

Ainsi, l'évapotranspiration réelle totale ETR qui représente la quantité totale d'eau consommé par la culture durant sa saison végétative est donnée par l'équation :

$$ETR = \sum_{i=1}^n ETR_i$$

Avec n , le nombre des mois dans la saison végétative

4.1.4. Estimation de l'eau virtuelle utilisée par unité de produit obtenu de la culture

La quantité totale d'eau virtuelle E_v (en m^3/kg) utilisée par kg de produit agricole (blé dur, blé tendre...) est estimée au moyen de la relation suivante :

$$E_v = \frac{10 \times ETR}{R}$$

Où ETR est en mm et R, qui représente le rendement de la culture, est en kg/ha.

4.1.5. Estimation de la quantité d'eau d'irrigation gaspillée

La quantité d'eau d'irrigation gaspillée est le volume d'eau donné par irrigation en plus des besoins en eau de la culture. Elle peut être estimée en procédant par plusieurs étapes :

- Estimation du besoin en eau total de la culture ;
- Estimation de l'évapotranspiration réelle totale de la culture en régime pluvial ;
- Calcul de la quantité totale d'eau d'irrigation donnée à la culture ;
- Estimation de l'eau d'irrigation gaspillée.

4.1.6. Estimation du besoin en eau total de la culture

Le besoin en eau total de la culture représente l'évapotranspiration maximale ETM de la culture durant toute sa saison végétative. Il est donné par l'équation:

$$ETM = \sum_{i=1}^n ETM_i = \sum_{i=1}^n Kc_i ETP_i$$

Pour le calcul de la quantité en eau consommée par la culture, on tient compte du calcul du stock hydrique du sol, la pluie efficace (pluie efficace = $0.8 \times$ pluie utile) et les doses apportées pour toutes les irrigations au niveau du cycle cultural.

4.1.7. Estimation de l'évapotranspiration réelle totale de la culture en régime pluvial

Si la culture est pratiquée en régime pluvial, l'évapotranspiration réelle totale produite qui représente sa consommation totale en eau durant sa saison végétative est donnée par l'équation:

$$ETR = \sum_{i=1}^n ETR_i$$

Avec:

$$ETR_i = \begin{cases} P\hat{u}_i + S_{i-1}siP\hat{u}_i + S_{i-1} < ETM_i \\ ETM_i siP\hat{u}_i + S_{i-1} \geq ETM_i \end{cases}$$

4.1.8. Calcul de la quantité totale d'eau d'irrigation donnée à la culture

La quantité totale d'eau d'irrigation apportée à la culture durant sa saison végétative est obtenue au moyen de l'équation:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

Tableau 1. Données récapitulatives des fiches technico-économiques moyennes par étages bioclimatique- Cas des céréales

Cultures	Etage Bioclimatique	Recettes (DT)	Charges. Proportionnelles (DT)	Charge d'eau (DT)	MB/Ha (DT)	MB/ha sans charge d'eau (DT)	Eau d'irrigation apportée (m ³ /ha)	Eau pluviale utilisée (m ³ /ha)	Production (kg/ha)	EV m ³ /kg	Eau totale utilisée (m ³)	MB/m ³ d'eau (DT)
Blé dur pluvial	HSH	2224	1054	-	1170	1170	0	3578	3528	1,014	3578	0,32
	SAS	1824	845	-	979	979	0	3322	2744	1,211	3322	0,29
	SAI	1401	753	-	648	648	0	3349	2780	1,205	3349	0,19
Blé dur irrigué	HSH	2961	1067	20	1894	1914	1074	2962	4129	0,717	3231	0,474
	SAS	2921	1356	123	1565	1688	2025	3400	3752	0,906	5425	0,31
	SAI	2224	1031	259	1192	1452	2845	3413	2997	1,139	4603	0,23
	AS	2842	1491	433	1351	1784	3626	1120	4280	0,262	4409	0,37
Blé tendre pluvial	HSH	2079	906	-	1173	1173	0	3700	3942	0,939	3700	0,31
	SAS	1946	935	-	1011	1011	0	3470	3030	1,145	3470	0,29
	SAI	1345	771	-	574	574	0	3346	2246	1,490	3346	0,17
Blé tendre irrigué	SAS	2641	1381	392	1259	1430	4070	2895	3881	0,075	5484	0,2
	HSH	1451	747	-	704	704	0	3892	2300	1,692	3892	0,18
Orge pluvial	SAS	1401	858	-	544	544	0	3000	14715	0,204	3468	0,15
	SAI	1447	832	-	615	615	0	3568	1500	2,379	3568	0,17
	HSH	2225	1059	145	1166	1311	602	3080	3300	0,933	3531	0,35
Orge irrigué	SAS	2034	971	126	1064	1190	750	3436	3570	0,962	3913	0,28
	SAI	1761	950	150	811	961	2761	4041	2916	1,386	4056	0,14
	SAS	1562	815	-	747	747	0	2766	14715	0,188	2766	0,27
Avoine pluvial	SAI	1440	751	-	689	689	0	3668	1500	2,445	3668	0,18
	SAI	2131	922	154	1209	1363	1148	3633	2222	1,635	4170	0,28
Triticale pluvial	HSH	2048	825	-	1223	1223	0	4232	2572	1,645	4232	0,28

Pour le blé dur en pluvial, les rendements observés, lors de l'enquête, chez 3 agriculteurs dans l'étage bioclimatique humide-subhumide (HSH) était de 47.6 , 48 et 60 quintaux/ha. En irrigué, le rendement le plus élevé qui est de 60 quintaux/ha a été observé chez un agriculteur au Kef qui se trouve dans l'étage bioclimatique semi-aride supérieur (SAS). Il est à noter que ces rendements apparaissent au niveau des fiches technico économiques moyennes élaborées au cours des enquêtes.

En outre, dans l'étude de Rezgui (2014) qui a consisté, entre autres, à mener des essais d'irrigation du blé dur entre 1996 et 1999 en apportant des volumes d'eau d'irrigations variant de 120 à 320 mm selon la zone en Tunisie, les rendements du blé dur en irrigué ont dépassé les 100 qx/ha dans certaines régions. Les rendements moyens étaient de 64 à 78 qx/ha selon les variétés. Dans ce contexte, Sayar et al., (2007) ont évalué les rendements de quatre variétés tunisiennes et une lignée australienne du blé dur au cours des deux campagnes agricoles (2002-2003 et 2003-2004) dans deux bioclimats différents 'Béja' (tempéré) et 'Kef' (froid) en irrigué et en pluvial, les auteurs ont montré que dans les deux environnements, l'irrigation d'appoint a provoqué une augmentation moyenne du nombre de grains par épi de 18.62%, de la durée de la période végétative (13.65%), du poids du grain, du nombre d'épis par m² (6.5%) et de la durée de remplissage des grains (2.5%) et par conséquent une augmentation moyenne du rendement en grains (31%) a été enregistrée. Par ailleurs, dans notre cas une irrigation complémentaire du blé dur dans l'humide subhumide a engendré une augmentation des rendements égales à 17% de même dans le semi aride supérieur (SAS) un apport d'eau de 202 mm a amélioré les rendements des variétés testées de 36.74%. L'irrigation d'appoint a permis un accroissement des rendements de l'orge dans le semi aride supérieur et le semi aride inférieur de 60.67% et 90%, respectivement. Chadouli (1991) a montré qu'en Tunisie, des apports de 176 mm entre les mois de Février et Mars ont doublé les rendements. Un rendement de 43,4 qx/ha a été obtenu avec deux irrigations, le témoin non irrigué donnait 20,6qx/ha. Ainsi, les valeurs indiquées par les fiches technico-économiques nous ont permis de constater qu'il est possible d'obtenir des rendements supérieurs à 70 qx/ha pour le blé dur à haut rendement (variétés Khiar et Karim) pratiquées en irrigué dans les zones HSH et en apportant des volumes d'eau ne dépassant pas 150 mm en moyenne. Dans ce cas, la marge brute serait d'environ 3800 DT/ha et la marge brute par mètre cube d'eau serait de 2.5 DT/m³. L'augmentation des superficies des céréales sous irrigation d'appoint est souhaitée dans les zones à haut rendement et où les terres ne peuvent pas être allouées à l'arboriculture (terres lourdes argileuses du Nord-est du pays). La valorisation de l'eau est alors conditionnée par les bonnes pratiques de la céréaliculture et de l'irrigation qui permettent d'obtenir les meilleurs rendements. Augmenter les superficies des céréales sous irrigation d'appoint dans les zones à haut rendement est justifiée par la différence de l'équivalent en eau et du rendement qui existe entre les deux techniques de production des céréales (en régime pluvial et sous irrigation d'appoint). La valorisation de l'eau virtuelle reste alors fortement liée à la bonne gestion à la parcelle et à l'élaboration d'un bon calendrier d'irrigation qui peut nous aider à réduire le gaspillage de l'eau tout en préservant un rendement souhaitable pour la culture. De ce fait la culture céréalière reste fortement liée à la politique agricole du pays, par laquelle on peut expliquer le fort taux d'importation des céréales. Et qui ne peut être amoindri que par un effort global et une vaste sensibilisation et une vulgarisation surtout pour les différents modes d'irrigations. Tout ça pourra amener à améliorer la balance économique du pays et à garantir une sécurité alimentaire. L'irrégularité et la variabilité des précipitations font que les céréales sont confrontées durant leur période sensible, à un déficit hydrique. L'irrigation d'appoint représente une alternative nécessaire, sinon indispensable, afin d'améliorer les rendements, une production qui est en deçà des normes. Un apport de 200 mm/ha au printemps n'altère en rien les potentialités hydriques et améliore d'une façon significative les rendements. Des apports d'eau pendant le remplissage des grains permettent la disponibilité de semences de qualité et en quantité suffisante pour la production céréalière. En Tunisie, malgré une superficie réduite ne dépassant pas 7% de la surface agricole utile du pays, le secteur irrigué contribue pour 32% de la production totale et 20% de l'exportation agricole. Il assure en effet, 95% de la production maraîchère, 45% de la production fruitière et 12% des produits de l'élevage (Louhichi, 1999).

5. Evaluation de l'eau virtuelle (m³/kg) et bilan hydrique des régions productrices des céréales en Tunisie.

L'eau virtuelle correspond à la quantité d'eau consommée au cours de la production d'un bien agricole en d'autre terme c'est la quantité d'eau évapotranspirée par les cultures.

La part relative de l'une et de l'autre dans la consommation globale de l'eau par les cultures peut varier considérablement. Pour le blé dur, les quantités d'eau d'irrigation supplémentaires apportées ont permis une diminution importante de la quantité d'eau virtuelle consommée par la culture, cette quantité varie de 0.066 m³/kg dans le semi-aride supérieur jusqu'à 0.3 m³/kg dans l'humide subhumide et le semi-aride supérieur. Chez l'orge l'importance de l'irrigation d'appoint s'est manifestée par une diminution considérable de l'EV consommée qui atteint 0.99 m³/kg dans le semi-aride supérieur et 0.76 m³/kg dans l'humide subhumide. Une diminution modérée de l'EV a été observée chez le blé tendre cultivé dans le semi-aride supérieur. L'estimation de l'eau virtuelle pour la céréaliculture nous aide à mieux comprendre l'exigence hydrique de celle-ci, et à la comparer aux valeurs moyennes mondiales. Selon l'UNESCO, la production mondiale de blé consomme près de 790 milliards de m³ d'eau par an, ce qui représente environ 12% de l'eau totale utilisée pour les cultures agricoles. Produire 1 kg de blé ou d'orge correspond à 1300 litres d'eau. En comparaison, 900 litres sont nécessaires pour 1 kg de maïs.

Le tableau n° 2 illustre le bilan hydrique des gouvernorats producteurs du blé dur, blé tendre, avoine et orge. EV1 présente l'eau virtuelle consommée par la culture en m³/ha, EV2 présente l'eau virtuelle totale en m³ consommée par la culture dans une région bien déterminée, cette composante est divisée en Eau verte et Eau bleue, ces dernières valeurs sont aussi présentées dans le même tableau. EV3 présente les valeurs d'eau virtuelle en m³/ Kg de production.

Tableau 2 . Bilan hydrique des gouvernorats producteurs de céréales

Gouvernorat	Culture	Production (kg/ha)	EV1 (m ³ /ha)	EV2 (m ³)	EV3 (m ³ /kg)
Béja	Blé dur	2915	4056	401923041	1,39
	Blé tendre	2500	4159	95645500	1,66
	Orge	2490	4289	81057224	1,72
Bizerte	Blé dur	3326	3678	220285074	1,10
	Blé tendre	3460	3440	55384000	0,99
Grand Tunis	Avoine	4050	3398	69462296	0,8
	Blé dur	3738	3065	79386953	0,82
	Blé tendre	3872	3066	37714260	0,79
	Orge	2875	3118	58934925	1,00
Jendouba	Blé dur	3729	3183	215463487	0,85
	Orge	2000	3531	64614921	1,76
Kef	Avoine	2333	3314	57522649	1,42
	Blé dur	2990	4083	291142499	1,36
	Blé tendre	2000	3983	76473600	1,99
	Orge	2417	4164	500500780	1,72
Siliana	Avoine	2250	3816	96342638	1,69
	Blé dur	2414	4167	368369872	1,72
	Orge	1913	4455	245045900	2,33
Zaghuan	Avoine	1610	3401	63640194	2,11
	Blé dur	2500	3442	78831614	1,37
	Blé tendre	2933	3762	59444867	1,28
	Orge	1992	2911	91098650	1,46

Les résultats des calculs relatifs au bilan hydrique des régions de Béja et de Bizerte respectivement à dominance céréalière et à conduite pluviale pourraient être expliqués par les conditions climatiques favorables à la culture des céréales plus précisément à la pluviométrie annuelle qui couvre presque tous les besoins de la plante dans ces deux régions, à la nature du sol riche en matière organique qui joue le

rôle de volant hydrique ainsi que par le coût élevé des systèmes d'irrigation. Il faut signaler aussi l'impact de l'installation du programme national d'amélioration génétique des céréales à la station expérimentale de Béja qui rayonne sur la région et tend toujours à améliorer le paquet technologique utilisé par les agriculteurs.

Le blé dur dans ces deux régions présente la culture majoritaire avec 159 000 ha de superficie et une part d'eau virtuelle totale (EV2) supérieure à 660 Millions de m³. Une différence significative d'EV3 est observée pour le blé tendre entre ces deux gouvernorats. L'indice EV3 pour le blé tendre est de 1,66 m³/kg et 0,99 m³/kg pour Béja et Bizerte respectivement, cette différence est peut être due à la baisse du rendement de cette céréale à Béja suite à l'attaque par la rouille, considérée parmi les plus importantes maladies foliaires du blé en Tunisie. Les dégâts causés par cette maladie sont devenues de plus en plus graves ces dernières années à cause de la sensibilité de la majorité des variétés tunisiennes cultivées et l'aptitude du pathogène à la diversité (Mosbahi, 2010).

Le bilan hydrique des régions du Grand Tunis montre que la céréaliculture est pratiquée en mode pluvial avec zéro gaspillage d'eau et des valeurs d'eau virtuelle (EV3) inférieures à celles observées dans les régions de Béja et Bizerte.

Le tableau n°2 indique les résultats des calculs relatifs au bilan hydrique de la région de Zaghuan. La quantité d'eau d'irrigation totale est de l'ordre de 126 Millions de m³, 25% de cette quantité est gaspillée. Les céréales sont cultivées sur une superficie de 88,000 ha.

Le bilan hydrique du gouvernorat de Jendouba, indique que la majorité des cultures pratiquées dans cette région sont en irrigué. La quantité d'eau d'irrigation totale est de l'ordre de 61 Millions de m³, 49% de cette quantité est gaspillée. Les céréales sont les plus cultivées avec une superficie de 103,000 ha. L'irrigation pour le cas du blé est une «humectation d'appoint» pour s'échapper à la sécheresse qui coïncide généralement avec le remplissage des grains, un stress hydrique pendant cette période altère la vitesse et la durée de la mobilisation des réserves vers le caryopse du blé et de l'orge. Si on compare les quantités d'eau d'irrigation apportées dans cette région à celles du Centre Ouest ou au Nord Est, on remarque que ces doses d'irrigation proche de 400 mm surpassent extrêmement des doses de 130 mm. Malgré cette faible quantité d'eau d'irrigation, la majorité de l'eau est gaspillée car les doses sont appliquées pendant les semailles (mois de novembre) et du tallage (février). Au moment du semis la pluviométrie est, généralement, supérieure aux besoins des cultures. Par contre, les irrigations deviennent indispensables à partir du mois du Janvier si on se confronte à un hiver sec pour s'échapper de l'effet néfaste du stress hydrique sur les cultures céréalières. Nous pouvons dire alors que les agriculteurs doivent être plus judicieux et habiles en ce qui concerne le moment d'irrigation, nous savons très bien les répercussions néfastes de manque d'eau durant la phase de l'épiaison et le remplissage des grains. Un stress hydrique pendant l'anthèse provoque l'avortement des fleurs et réduit la fertilité de l'épi, ceci se répercute de façon directe sur le rendement en grains.

Donc l'irrigation au cours de cette phase sera beaucoup plus profitable. Durant les deux dernières campagnes agricoles (2014/2015 et 2015/2016) en plus des faibles quantités de pluie reçues, les cultures céréalières ont souffert des périodes assez longues de sécheresse et des températures élevées qui s'étalent sur plus de trois mois (fin novembre-début février) ceci a endommagé le démarrage de la culture par une diminution considérable de la végétation (nombre de talles par plante) ce qui affecte la vigueur de la plante d'une part et d'autre part, il provoque une chute du rendement en grains. Ben Nouna et Bachtobji (2014) ont montré un impact significatif de l'établissement des calendriers d'irrigation de la culture de blé dur, avec une augmentation entre 17 et 34% du rendement, une réduction entre 8 et 43% des apports d'eau d'irrigation et une amélioration consistante de l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation.

Pour le bilan hydrique de la région de Siliana, la quantité d'eau d'irrigation totale est de l'ordre de 38 Millions de m³ principalement données à la culture d'avoine en irriguée, on constate qu'une grande partie est gaspillée. Ces pertes énormes d'eau d'irrigation, sont dues à l'irrigation excessive de l'avoine (Tableau 2). Vue l'augmentation des prix de l'orge durant les cinq dernières années l'avoine est devenue une bonne alternative pour les agriculteurs comme plante fourragère. Afin, d'obtenir une excellente biomasse, les éleveurs sèment l'avoine à densité de peuplement élevée et ils apportent des doses d'irrigation énormes pour favoriser le développement végétatif nécessaire pour couvrir les besoins quotidiens de leurs animaux.

Le tableau 2 illustre les résultats des calculs relatifs au bilan hydrique de la région de Kef, dans cette région la quantité d'eau d'irrigation totale est de l'ordre de 19 Millions de m³, 28% de cette quantité est gaspillée. Le blé dur, le blé tendre et l'orge dans le gouvernorat du Kef sont cultivés en mode pluvial. Cependant, une irrigation complémentaire des céréales dans cette région s'est avérée très utile. Dans ce

sens, Rezgui (2014) a montré qu'une irrigation modérée (40% de la réserve utile du sol (RU)) chez quelques variétés du blé dur dans la région du Kef a amélioré l'efficacité d'utilisation de l'eau pour le rendement en grains par rapport au régime hydrique le plus irrigué (70% RU).

6. Conclusion

L'alimentation tunisienne repose sur une forte consommation de céréales, essentiellement le blé dur dans le nord et l'orge dans le centre et le sud. Le blé tendre (pain de boulangerie), antérieurement réservé aux centres urbains, s'est introduit récemment de plus en plus dans les habitudes de consommation des ruraux.

Le total des ressources eau de la Tunisie est estimé en moyenne à 4,860 millions de m³ dont 2,160 millions de m³ comme eaux souterraines soit 44,4% et 2,700 millions de m³ comme eaux de surface soit 55,6%. Comparées aux autres pays du Maghreb, ces ressources sont faibles, en raison de la taille modeste des bassins hydrologiques et du pays; en plus des précipitations limitées. La rareté des ressources en eaux serait un facteur déterminant dans la politique de leur mobilisation, ainsi que du rôle de l'Etat, principal acteur de la politique hydraulique du pays. En raison de sa rareté, l'eau constitue donc un enjeu fondamental pour le développement actuel et futur de la céréaliculture en Tunisie

Pour le blé dur en mode pluvial, les rendements observés, lors de l'enquête, chez 3 agriculteurs dans l'étage bioclimatique humide-subhumide (HSH) était de 47.6, 48 et 60 quintaux/ha. En irrigué, le rendement le plus élevé qui est de 60 quintaux/ha a été observé chez un agriculteur au Kef qui se trouve dans l'étage bioclimatique semi-aride supérieur (SAS). En outre, dans l'étude de Rezgui et al. (2000) qui a consisté, entre autres, à mener des essais d'irrigation du blé dur entre 1996 et 1999 en apportant des volumes d'eau d'irrigations variant de 120 à 320 mm selon la zone en Tunisie, les rendements du blé dur en irrigué ont dépassé les 100 qx/ha dans certains endroits. Les rendements moyens étaient de 64 à 78 qx/ha selon les variétés. Les services du ministère de l'agriculture chargés de la production végétale sont très conscients de ce potentiel et font beaucoup d'effort pour amener les agriculteurs des périmètres irrigués d'introduire les céréales dans les assolements. En effet Une stratégie du développement du secteur des céréales proposée par le ministère de l'agriculture en 2009 arrête parmi les objectifs spécifiques pour l'horizon 2016 d'irriguer 125,000 ha de céréales en 2014 et 130,000 ha en 2016.

Ainsi, les valeurs indiquées ci-dessus nous ont permis de constater qu'il est possible d'obtenir des rendements supérieurs à 70 qx/ha pour le blé dur à haut rendement (variété Khiar et Karim) pratiqué en irrigué dans les zones HSH et en apportant des volumes d'eau ne dépassant pas 150 mm en moyenne. Dans ce cas, la marge brute serait d'environ 3800 DT/ha et la marge brute par mètre cube d'eau serait de 2.5 DT/m³.

Le bilan hydrique d'un pays fondé sur une gestion intégrée de l'eau verte, de l'eau bleue et de l'eau virtuelle indique que dans le futur, l'amélioration de la sécurité alimentaire, dans les pays arides et semi-arides sera liée à la capacité de pays à gérer l'eau disponible notamment celle en rapport avec l'agriculture pluviale.

7. Remerciements

Le travail s'inscrit dans le cadre du projet «Eau Virtuelle et Sécurité Alimentaire en Tunisie: du Constat à l'Appui au Développement» (EVSAT: CAD) financé par le Centre de Recherches pour le Développement International.

8. Références Bibliographiques

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, D., (1998). Crop evapotranspiration. Guides for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. N° 56. Italy, 300 p.
- Bachta M S, 2011. La céréaliculture en Tunisie Une politique de régulation à repenser. Les notes d'analyse du CIHEAM N° 64 – Décembre 2011 .
- Ben Nouna B. et Bachtobji M., 2014. Développement des calendriers d'irrigation pour la conduite du blé dur dans les conditions semi-aride et aride de la Tunisie. Journée Nationale sur la valorisation des résultats de la Recherche dans le domaine des Grandes Cultures Tunis, le 17 avril 2014. Disponible sur : http://www.iresa.agrinet.tn/images/Ben_Nouna_Bechir.pdf
- Chadouli A., 1991. Irrigation des céréales : situation et perspectives. MEDIT. Perspectives et Propositions Méditerranéennes, Revue d'Economie, d'Agriculture et Environnement, 3, 27-29.
- Chahed J., Hamdane A., Besbes M (2007) – Bilan intégral des ressources en eau de Tunisie, sécurité hydrique et sécurité alimentaire. La houille Blanche N°3, 2007.
- Chahed J., Hamdane A., Besbes M (2008) – A comprehensive water balance of Tunisia: Bleu water, Green water, Virtual water. Water International 33:4. pp 415-424.

- El Felah M. et Gharbi MS, (2014).** Les céréales en Tunisie: Historique, contraintes de développement et perspectives. Journée Nationale sur la valorisation des résultats de la Recherche dans le domaine des Grandes Cultures Tunis, le 17 avril 2014. Disponible sur : http://www.iresa.agrinet.tn/annonce/Actes_de_la%20journee_nationale_.pdf
- FAOSTAT, 2013.** website. <http://faostat3.fao.org/download/R/RL/E>
- Fernandez S. (2008).** L'eau virtuelle, quel éclairage pour la gestion et la répartition de l'eau en situation de pénurie ? [Http://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs712_article.pdf](http://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs712_article.pdf)
- Fernandez S., Thivet G. (2008)** – L'eau virtuelle, quel éclairage pour la gestion et la répartition de l'eau en situation de pénurie ? XIIIth World Water Congress – Global changes and water resources: confronting the expanding and diversifying pressures. Montpellier, France, 1-4 September.
- Hamdane A., 2013.** La triade « eau bleue, eau verte, eau virtuelle » et la sécurité alimentaire en Tunisie. Dossier Eau et sécurité alimentaire et dynamiques régionales pour un défi planétaire. Demeter. 19, 65-73.
- 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 Report Series No. 11. Septembre 2002.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q., 2005.** Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. Global Environmental Change, 15, 45-56.
- Laajimi A. (2007).** Les périmètres irrigués en Tunisie Un enjeu pour le développement de la production agricole N°30 –Institut National Agronomique de Tunisie (INAT)
- Louhichi. K. (1999).** L'amélioration de l'efficacité de l'irrigation pour une économie d'eau: cas d'un périmètre irrigué en Tunisie Rapport final.
- Mosbahi M., (2010).** Hérité de la résistance du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) au *Puccinia triticina* Eriks agent causal de la rouille brune. Thèse de doctorat en sciences agronomiques de l'INAT.
- Novo, P., Garrido, A., Varela-ortega C., 2009.** Are virtual water “flows” in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity? *Ecological Economics*, 68, Issue 5, 1454-1464.
- Rezgui M., Ben Mechlia N., Bizid E., Kalboussi R., Hayouni R. 2000.** Etude de la stabilité du rendement de blé dur dans différentes régions de la Tunisie. In : Royo C. (ed.), Nachit M. (ed.), Di Fonzo N. (ed.), Araus J.L. (ed.). Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges . Zaragoza : CIHEAM. p. 167-172 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 40)
- Rezgui M., 2014.** Irrigation de complément et efficacité de l'utilisation de l'eau de quelques variétés de blé dur cultivées en Tunisie. Journée Nationale sur la valorisation des Résultats de la Recherche dans le Domaine des Grandes Cultures Tunis, le 17 avril 2014. Disponible sur : http://www.iresa.agrinet.tn/images/Mohsen_REZGUI.2.pdf
- Sayar R., Khemira H., Kharrat M., 2007.** Inheritance of deeper root length and grain yield in half-diallel durum wheat (*Triticum durum*) crosses. *Ann Appl Biol* 151, 213-220.
- Siebert S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T. 2010.** Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1863–1880.
- Slama A., Ben Salem M., Ben Naceur M., Zid E, 2005.** Les céréales en Tunisie : production, effet de la sécheresse et mécanismes de résistance. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. Volume 16, numéro 3, juillet-août-septembre 2005.
- Wichelns, D., 2001.** The role of ‘virtual water’ in efforts to achieve food security and other national goals, with an example from Egypt. *Agricultural Water Management* 49(2): 131–151.
- Zhang, C., Anadon, L.D., 2014.** A multi-regional input–output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 100, 159-172.
- Zhan-Ming, C., Chen, G.Q., 2013.** Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, 28, 142-149.
- Zho, N., Samson, EL., 2012.** Estimation of virtual water contained in international trade products using nighttime imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 243–250.