

Landsat 8 and Sentinel 2 for mapping Borj Touil' irrigated district land use/land cover and water requirements

Landsat 8 et Sentinel 2 pour la cartographie des occupations du sol et des besoins en eau du périmètre irrigué de Borj Touil

BETTAIBI A.^{1,2} ERGAIEG K.^{1*} LABIEDH C.³ ANANE M.²

¹ *Ecosystems and Aquatic Resources Research Unit, National Agronomic Institute of Tunisia (INAT), 43 Avenue Charles Nicolle, Tunis 1082, University of Carthage, Tunisia*

² *Laboratory of Wastewater and Environment, Water Research and Technologies Center (CERTE) Ecopark Borj Cedria, Touristic road of Soliman, BP273, Soliman 8020, Tunisia*

³ *Regional Commissariat for Agricultural Development of Ariana (CRDA), Tunisia*

*Corresponding author: kergaieg@yahoo.fr

Abstract - From Mediterranean leadership to the current deceleration, the reuse of reclaimed water for irrigation in Tunisia still arouse as much excitement and interest. The main objective of this work is to assess the satellite image time series contribution to raise knowledge of operation and management system of irrigated public districts with reclaimed water. To do so, i) the Borj Touil' irrigated district land use/land cover (LULC) of winter 2015/2016 and summer 2016 were mapped using Landsat 8 and Sentinel 2 satellites data, ii) the water requirements of the main crops of this area were mapped and estimated coupling remote sensing and CROPWAT model, and iii) the obtained information was compared to the available official statistics. The results are threefold: (i) the accuracy of summer LULC map obtained using decision tree followed by maximum likelihood classification is satisfactory, and (ii) irrigated agricultural intensification rates estimated by remote sensing are close to those provided by the official institutions, being respectively 11.5% and 12%. However, a notable discrepancy is observed for the cropped areas as well for the amount of irrigation water supplied and needed. In winter the water provided for irrigation is lower than needed while in summer is the other way around. (iii) Integrating remote sensing techniques with conventional methods offer an important added-value for improving statistics accuracy on districts irrigated with reclaimed water and to raise knowledge of their operation and management systems.

Keywords: reclaimed water reuse; irrigated district; land use/land cover; water requirements; remote sensing; Cropwat.

Resumé - Du leadership en méditerranée au retard actuel, la filière tunisienne de réutilisation des eaux usées traitées en irrigation suscite toujours autant d'engouement et d'intérêt. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'apport de séries temporelles d'images satellites dans l'amélioration des connaissances sur les caractéristiques d'exploitation et d'aménagement des périmètres publics irrigués à partir des eaux usées traitées. Pour se faire, nous avons : i) cartographié l'occupation du sol du périmètre irrigué de Borj Touil de l'année agricole 2015/2016 en utilisant les données de satellites Landsat 8 et Sentinel 2, ii) cartographié et estimé les besoins en eau des principales cultures de ce périmètre par couplage télédétection – Cropwat, et iii) comparé les résultats obtenus avec les statistiques officielles disponibles. Les résultats dégagés sont triples : (i) la méthode de classification des cultures estivales en utilisant l'arbre de décision suivie par l'algorithme de maximum de vraisemblance est satisfaisante, et (ii) les taux d'intensification agricole en irrigué estimés par télédétection ou par les institutions officielles sont comparables, respectivement, 11,5% et 12%. Cependant, une notable discordance est remarquée pour les superficies cultivées mais également entre les besoins et l'approvisionnement en eau d'irrigation. La distribution de l'eau d'irrigation en hiver est déficitaire alors qu'elle est excédentaire en période estivale. Enfin, (iii) l'intégration des techniques de télédétection aux méthodes classiques apporte plus de précision aux statistiques des périmètres irrigués à partir des eaux usées traitées et améliore les connaissances sur l'exploitation et l'aménagement de ces systèmes.

Mots-clés : réutilisation des eaux usées ; périmètre irrigué; occupation du sol ; besoins en eau ; télédétection ; Cropwat.



1. Introduction

Depuis 2002 et la parution d'une stratégie nationale de la réutilisation des eaux usées traitées (REUT), de grandes études nationales thématiques ont été produites (SCP, 2018). La majorité de ces études repose, en partie, mais non exclusivement, sur des statistiques produites par les services de l'administration ou des organismes publics, complétées selon les besoins par des enquêtes de terrain spécifiques pour chaque périmètre irrigué, et analysées d'un point de vue d'expert. Il en ressort, à l'évidence, des thèmes et points de vue récurrents notamment la problématique du niveau de qualité sanitaire des eaux usées traitées (EUT) et les restrictions relatives au choix de cultures (AHT, 2009 ; BRL, 2019 ; Hamdane, 2019), mais également l'approvisionnement irrégulier en eau d'irrigation dans certaines installations. Ce dernier point constitue un facteur limitant pour la mise en valeur agricole des périmètres aménagés en irrigué et par-là même pour la promotion du recyclage agricole des eaux usées. En tout état de cause, comprendre les besoins et la disponibilité de l'eau actuelle et future est indispensable pour une préservation durable des périmètres irrigués à partir des EUT (Ben Brahim-Neji et Turki, 2015). Une bonne estimation des superficies des cultures réalisées et effectivement irriguées, et donc les taux d'intensification en irrigué, est essentielle pour élaborer des stratégies d'amélioration des performances de ces périmètres (BRL, 2019).

D'un point de vue général, l'évaluation des performances de REUT repose sur des statistiques annuelles caractéristiques de l'évolution de l'exploitation et de l'aménagement des différents périmètres irrigués (cultures emblavées, superficies irriguées, techniques d'irrigation, consommation d'eau, rendements agricoles, coûts de revient et valorisation de l'eau, etc.) (DG GREE, 2017). La collecte ou l'élaboration périodique de ces données est souvent une opération lourde et fastidieuse qui demande du temps et une certaine expertise. Ces statistiques peuvent être obtenues sur la base de techniques classiques de collecte de données telles que les enquêtes d'échantillonnage, les évaluations d'experts, les déclarations d'agriculteurs et les modèles allométriques (FAO, 2018). Selon la méthode adoptée, le processus d'estimation pourrait être enclin à de nombreuses erreurs en raison d'observations incomplètes sur le terrain ou bien de la subjectivité des experts et/ou des répondants (Ben Brahim-Neji *et al.*, 2014 ; Mehdaoui et Anane, 2020). A l'échelle nationale, les statistiques relatives à chaque périmètre irrigué sont communiquées sans précision des indices d'erreur, ou intervalles de confiance associés, ni de cartes thématiques. La cartographie et l'analyse spatiale seraient vraisemblablement peu considérées pour la caractérisation des exploitations et des aménagements des différents périmètres irrigués par les EUT (Anane *et al.*, 2012, 2014 ; Bahri *et al.*, 2015 ; Ben Brahim-Neji et Turki, 2015), notamment le couplage de la distribution spatio-temporelle des occupations du sol et des besoins en eau. Ceci permettrait par ailleurs de mesurer l'adéquation entre volumes évalués et ceux prélevés pour les usages agricoles (BPEH, 2019).

Dans un contexte de réhabilitation / extension des stations d'épuration, comme de modernisation des périmètres irrigués, et d'élaboration du plan directeur national de réutilisation des EUT en Tunisie "Water Reuse 2050", d'ores et déjà entamés, le moment est favorable pour évaluer la situation et de tirer les leçons afin d'éviter de reproduire les mêmes erreurs du passé et de s'orienter vers de nouvelles options. Aujourd'hui, l'extension des méthodes d'analyses intégrées comme les systèmes d'information géographique (SIG), et les avantages de la télédétection, nous permettent d'améliorer les connaissances sur la mise en valeur agricole des périmètres irrigués et les besoins en eau au service de la durabilité des agro-systèmes irrigués à partir des EUT (Ozdogan *et al.*, 2010 ; Bettaibi *et al.*, 2018). La présente étude vise à fournir des informations factuelles pour sensibiliser les décideurs à des approches nouvelles ou différentes pour évaluer la situation des périmètres irrigués avec les EUT, en prenant comme cas d'étude le périmètre public irrigué (PPI) de Borj Touil. Les objectifs spécifiques de notre étude consisteront à : i) établir les cartes d'occupation de sol du PPI Borj Touil pour les cultures hivernales et estivales à partir des images satellites Landsat 8 et Sentinel 2, et ii) cartographier la répartition spatiale et estimer les besoins en eau d'irrigation, au regard des données de mise en valeur agricole et de consommation d'eau disponibles et/ou accessibles pour la campagne agricole 2015/2016.

2. Méthodologie

2.1. Présentation de la zone d'étude

Le PPI Borj Touil, irrigué à partir des EUT, couvre une superficie totale brute de 3545 ha dont la superficie décrétée est de l'ordre de 3200 ha, mais couramment assimilée à 3145 ha irrigable. Il s'agit du plus grand périmètre irrigué à partir des eaux usées traitées dans le pays situé dans le gouvernorat de l'Ariana à environ 8 km de Tunis (Figure 1). Sur le plan paysager, la région présente une configuration homogène. Les altitudes y varient de 4 à 12 m NGT. La zone d'étude appartient au sous étage bioclimatique semi-aride supérieur caractérisé par un hiver doux et un été chaud. La température

moyenne annuelle de la région est d'environ 18°C et la pluviométrie moyenne annuelle ne dépasse pas les 450 mm ; les valeurs moyennes annuelles de l'ETP oscillent entre 1200 et 1400 mm (Station de référence expérimentale de l'INRGREF à Cherfech). La couverture pédologique du périmètre irrigué est dominée par des sols peu évolués non climatiques à caractère vertique plus ou moins affectés par l'hydromorphie. Le réseau de drainage comprend un réseau d'assainissement superficiel couvrant la totalité du périmètre et un réseau de drainage enterré couvrant 500 ha (SERAH, 2008).

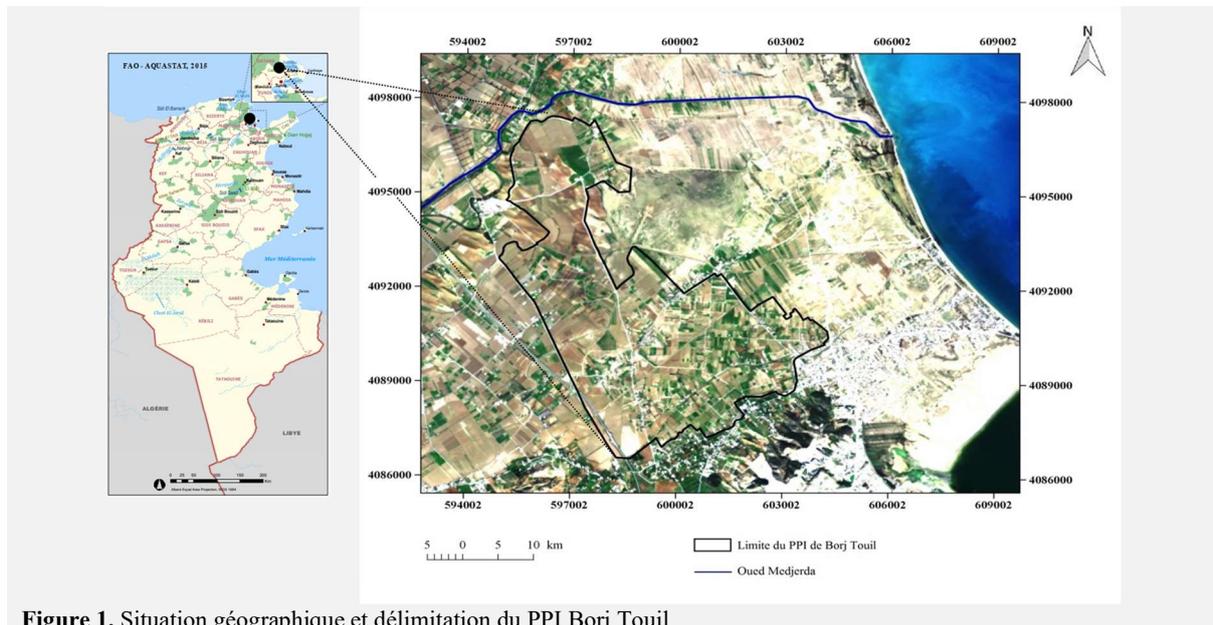


Figure 1. Situation géographique et délimitation du PPI Borj Touil

La zone de Borj Touil se trouve dans une région où les ressources en eau sont limitées avec un certain degré de restriction à l'usage assez sévère au regard de la réglementation tunisienne en vigueur. L'eau d'irrigation provient des stations d'épuration Charguia et Côtière Nord et du complexe d'épuration Choutrana. Les eaux usées traitées par ces quatre stations d'épuration sont évacuées par une chaîne de transfert, formé du canal El Khelij et de l'Oued El Khelij vers la mer. Une station de pompage prélève les EUT du dit canal à ciel ouvert et les refoule vers un bassin de régulation. Ce bassin assure l'alimentation des agriculteurs en eaux épurées nécessaires à l'irrigation.

L'activité agricole pratiquée est basée essentiellement sur les grandes cultures, notamment les cultures céréalières et les fourrages d'hiver conduits dans le système pluvial. La pratique de l'agriculture irriguée est basée sur le fourrage d'été. L'élevage des bovins et des ovins, est une activité assez présente dans cette région assimilée par ailleurs à un bassin laitier. La principale contrainte du développement agricole dans le périmètre est la qualité médiocre des eaux usées traitées. Ceci a orienté les agriculteurs à pratiquer une agriculture extensive conduite en sec. L'irrigation est pratiquée en général selon les besoins de l'élevage et les conditions pluviométriques notamment durant la période humide.

2.2. Cartographie de l'occupation du sol

La première étape de ce travail consiste à vérifier la limite du PPI en se fiant au plan de situation du périmètre fourni par le CRDA de l'Ariana. D'autres données numériques issues du bulletin de la Direction des sols sont utilisées pour valider et caractériser la zone d'étude (Braudeau *et al.*, 2001). Pour l'élaboration des cartes d'occupation du sol durant la campagne agricole 2015/2016, nous avons exploités des images acquises par les satellites Landsat-8 OLI et Sentinel-2A MSI, au total 12 images de Landsat et 9 images de Sentinel. Les images satellitaires datent de septembre 2015 jusqu'à septembre 2016, avec une fréquence d'une image par mois, afin de couvrir les principales cultures d'hiver et d'été. La méthodologie générale adoptée pour le PPI Borj Touil se décline en deux principales phases à savoir la classification des occupations du sol et l'estimation de besoins en eau des cultures.

La première phase porte sur la cartographie de l'occupation du sol moyennant deux techniques conventionnelles de classification des images satellitaires à savoir la méthode de classification supervisée par l'algorithme de maximum de vraisemblance (MV), et l'utilisation d'un arbre de décision suivie par classification supervisée par la méthode MV, respectivement, pour les cultures hivernales et estivales. L'algorithme de classification a été entraîné par des échantillons aléatoires stratifiés, sur la base d'une campagne de terrain menée en août 2016 pour déterminer les classes de vérité-terrain. Au

final, neuf classes d'occupation du sol ont été identifiées pour la période 2015/2016 : blé, orge, avoine, bersim ou trèfle d'Alexandrie, fenugrec, maïs ensilage, sorgho en grain, sorgho fourrager (en vert) et luzerne, soit au total une superficie de 148,33 ha répartie sur 66 parcelles, environ 3,41 % de la superficie totale de la zone d'étude. L'occupation du sol en arboriculture, essentiellement de l'olivier, est négligeable et ne dépasserait pas 0,5% de la superficie totale irrigable. Il convient de souligner que la conduite de l'olivier en pluvial et/ou en irrigué est peu développée et ne sera pas considérée par ailleurs dans nos hypothèses de travail, du moins pour la présente étude. L'évaluation et la validation des classifications des occupations du sol en hiver et en été reposent sur l'indice de précision globale (IG) et l'indice *Kappa* obtenus à partir de la matrice de confusion.

2.3. Besoins en eau d'irrigation

La deuxième phase de notre approche de travail consiste en l'estimation et la cartographie des besoins en eau totaux et nets de la superficie agricole. Pour l'estimation des besoins en eau, nous avons retenu le modèle Cropwat 8.0 (FAO, 2009). Les données climatiques d'entrée du modèle (températures min. et max. ; humidité relative de l'air ; vitesse du vent ; durée d'insolation ; pluviométrie) sont fournies par la station météorologique Cherfech, mais également par l'Institut National de la Météorologie (INM) pour l'année agricole 2015/2016. Le calcul des besoins totaux des cultures (*ETc*) selon la méthode FAO-56 est lié à l'évapotranspiration de référence (*ET0*) et au coefficient cultural (*Kc*). Ce dernier, est fonction du type de culture et de son état végétatif (Allen *et al.*, 1998).

$$ETc = \sum_{i=1}^n ETc_i = \sum_{i=1}^n Kc_i \times ET0_i$$

avec, *ETc* (mm) : évapotranspiration maximale ; *n* : nombre de phases végétatives pour chaque culture ; *Kc* : coefficient cultural.

En se fiant aux bulletins FAO-56 et FAO-25, la méthode d'estimation des besoins en eau nets retenue dans le cadre de cette étude est formulée comme suit :

Besoins nets = *ETc* – Pluie efficace = *ETc* - 0,8 P ; P : précipitation exprimée en mm.

La conception des cartes des besoins en eau totaux et nets pour l'ensemble des classes de cultures identifiées est basée sur la cartographie des occupations du sol en hiver et en été. Qu'il s'agisse des cartes de besoins en eau d'irrigation ou bien des occupations du sol, nous avons comparé les résultats obtenus avec les données collectées a posteriori auprès du CRDA de l'Ariana pour l'année agricole 2015/2016.

3. Résultats et discussion

3.1. Occupations du sol du PPI Borj Touil

Neuf principales cultures emblavées, ou plutôt neuf classes d'occupation du sol, ont été identifiées pour la campagne 2015/2016. Les cultures hivernales sont représentées par les céréales (blé, orge) et les fourrages (avoine, bersim ou trèfle d'Alexandrie, fenugrec), alors que les cultures estivales pratiquées étant essentiellement des fourrages dont le maïs, le sorgho et le sorgho fourrager (en vert) ; la luzerne étant présente sous forme de culture pérenne (en hiver et en été).

3.1.1. Carte d'occupations du sol d'hiver

Pour restituer l'état de l'occupation du sol en hiver, nous avons testé 55 combinaisons de bandes différentes par classification supervisée multi-temporelle des images Sentinel 2 et Landsat 8 en utilisant les données terrain comme zones d'entraînement. Les résultats d'exactitudes obtenus varient, entre 60 et 96 % et entre 0,5 et 0,95, respectivement, pour IG et *Kappa*. L'utilisation du NDVI comme bande additionnelle nous a permis d'obtenir une légère amélioration (1%) des indices d'exactitude. De surcroît, les valeurs de ces derniers augmentent avec le nombre d'images utilisées. La classification obtenue par combinaison de huit dates (05 octobre et 08 décembre 2015, 16 mai et 17 juin 2016 – Landsat 8 ; 06 février, 27 mars, 26 avril et 05 juin 2016 – Sentinel 2) nous a permis d'obtenir les valeurs d'IG et de *Kappa* les plus élevées, respectivement, 96% et 0,95. Cependant, toutes ces combinaisons omettent la classe de luzerne du résultat final. La transformation par ACP des bandes de classification combinant les huit dates nous a permis de conserver la totalité des classes étudiées, et ce, en se fiant aux 33 premières bandes de l'ACP. De par cette combinaison, nous avons obtenu pour l'IG et l'indice *Kappa*, respectivement, 94% et 0,92. Ces exactitudes sont considérées comme satisfaisantes et sont retenues pour la validation de la classification (Congalton et Green, 1999). Il convient de signaler que l'utilisation de quatre dates bien réparties dans le temps est satisfaisante dans notre cas d'étude pour atteindre des résultats fiables. Au final, la classification avec les indices de précision les plus élevés, sans perte significative de classes d'occupation du sol, a été adoptée pour la cartographie de l'occupation du sol

(Figure 2A). Cette dernière servira par la suite pour la conception des cartes de besoins en eau des cultures hivernales.

3.1.2. Carte d'occupations du sol d'été

Afin d'établir la carte d'occupation du sol pour les cultures d'été en 2016, nous avons exploré la méthode de classification par arbre de décision suivie par la classification supervisée. Pour l'élaboration de l'arbre de décision, nous nous sommes basés sur l'analyse des profils NDVI générés à partir des images satellite multi-dates (juin, juillet et août) afin de définir un seuil à partir duquel il serait possible de discriminer les parcelles éventuellement irriguées et non irriguées. Le seuil de séparation retenu pour l'indice NDVI est égal à 0,4. Ce seuil a été fixé suite à un suivi de l'évolution du NDVI tout au long des cycles végétatifs des cultures des parcelles échantillonnées. Ceci nous a permis dans un premier temps d'extraire la zone irriguée, et d'appliquer ensuite une classification supervisée de la zone irriguée pour l'élaboration de la carte d'occupation du sol (Figure 2B). La précision globale produite à l'issue de cette classification est de l'ordre de 90% et de 0,79 pour le coefficient *Kappa*. L'analyse de la carte d'occupation du sol révèle une dominance nette de la zone non irriguée (88,5%) avec un taux de couverture végétale faible de l'ordre de 11,5%.

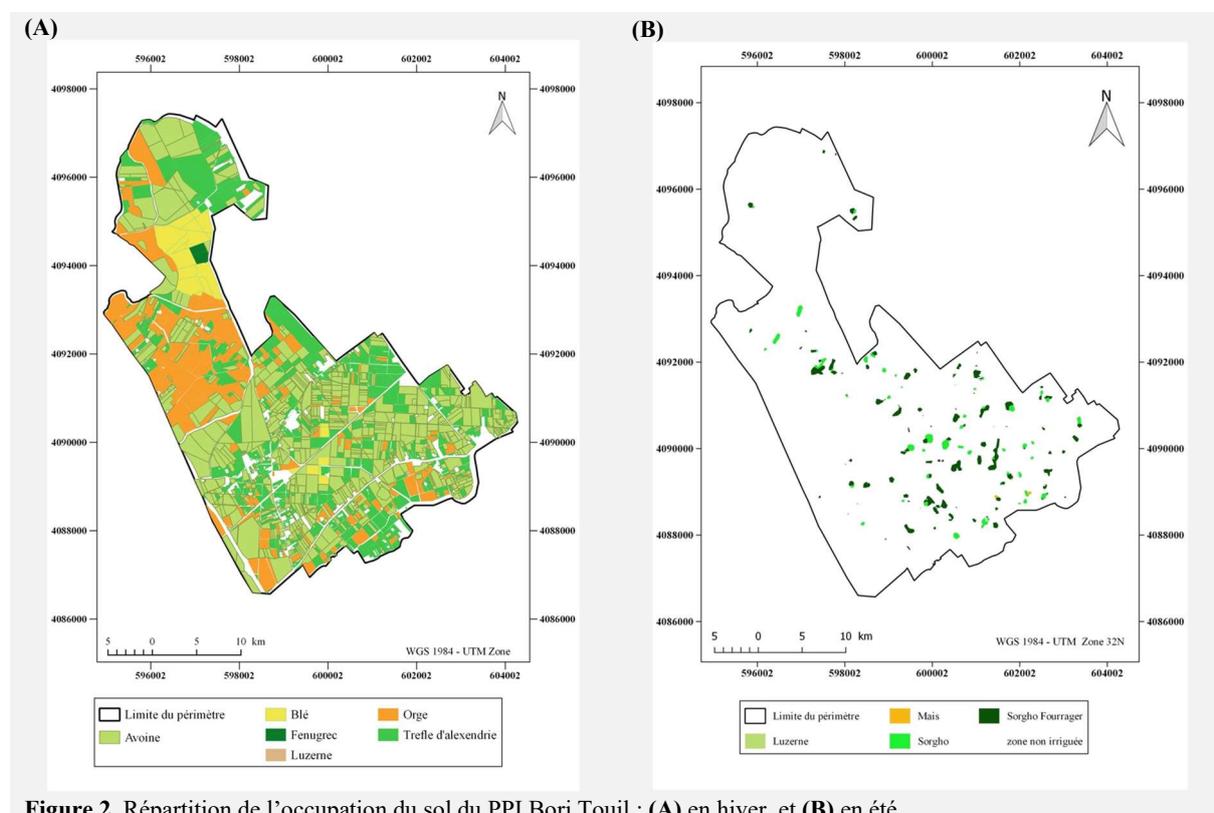


Figure 2. Répartition de l'occupation du sol du PPI Borj Touil : (A) en hiver, et (B) en été

3.1.3. Comparaisons et discussion

Le taux d'intensification des cultures irriguées constitue un bon indicateur à l'échelle nationale de la valorisation des aménagements hydrauliques dans les périmètres irrigués à partir des eaux usées traitées. Le taux d'intensification global moyen, en irrigué, enregistré sur la période 2000-2016, serait de l'ordre de 42% ce qui reste faible, alors qu'il n'est que de 32% sur la période 2015-2016 (DG GREE, 2017). En se fiant au rapport national sur la situation des périmètres irrigués à partir des EUT pour l'année agricole 2015/2016, le périmètre de Borj Touil a été le moins exploité seulement 389 ha sur 3145 ha aménagés, soit un taux d'intensification en irrigué d'environ 12%. Il convient de signaler par ailleurs que les taux d'occupation du périmètre et d'exploitation en irrigué sont relativement variables d'une campagne agricole à l'autre et s'expliqueraient en partie par la variabilité de la pluviométrie. D'autres facteurs pourraient expliquer également le taux d'intensification faible enregistré notamment la pratique de cultures céréalières et certains fourrages (en hiver), pouvant se satisfaire des apports pluviométriques (SAFI, 2013). En effet, la conduite des cultures en irrigué dans notre zone d'étude ne concernerait vraisemblablement que les fourrages d'été et des irrigations d'appoint pour les cultures hivernales.

En se fiant aux superficies totales mises en cultures durant la campagne 2015-2016, le taux d'occupation du sol est d'environ 98%. Cependant, le taux d'exploitation en irrigué n'est que de 11,42%, et ce, en se

fiant, mais qu'en partie et avec beaucoup de réserve, à la conduite des fourrages d'été en irrigué. Bien que ce résultat soit comparable avec les données renseignées par le CRDA, mais dans la limite de notre contexte et hypothèses de travail, il convient de signaler à ce niveau que l'enquête de terrain menée en août 2016 n'a pas permis de dégager clairement les superficies réellement irriguées en hiver. En effet, les agriculteurs orientent systématiquement les échanges vers les coupures fréquentes en été et voient leurs besoins insatisfaits en période de pointe. La conduite des cultures en hiver serait vraisemblablement en mode pluvial en se basant sur nos reformulations reflète (ou écho) des propos évoqués afin d'éviter toute transformation ou déformation des faits ou bien des réponses recueillies. Il s'agit de reprendre fidèlement les termes de l'agriculteur, ou d'autres termes acceptés comme équivalents. Par ailleurs, plusieurs cultures n'ont pas été vraisemblablement renseignées dans la dite enquête notamment le triticale et d'autres cultures fourragères (Fétuque, Ray-grass, Sulla, Féverole Egyptien), soit environ 3,87% de la superficie totale irrigable durant la campagne 2015/2016, en se fiant aux statistiques du CRDA.

Compte tenu des données fournies a posteriori par le CRDA, les céréales et les cultures fourragères occuperaient, respectivement, 53,54% et 46,46% de la superficie totale mise en culture par les exploitants. En revanche, pour la même période, nous avons constaté que les cultures prédominantes sont les fourrages, soit 77,85% de la superficie totale mise en culture ; les céréales ne représentent que 22,15% de la surface totale, principalement dominées par la culture de l'orge. Nos résultats seraient en cohérence avec l'état actuel de développement de l'élevage intégré dans la zone d'étude. En effet, l'élevage constitue l'une des principales activités économiques de la commune de Borj Touil, plus particulièrement dans le périmètre irrigué de Borj Touil caractérisé par la dominance de l'élevage bovin (vaches laitières et veaux d'engraissement) ; l'élevage ovin est peu représenté en raison de l'absence des zones de pâturage.

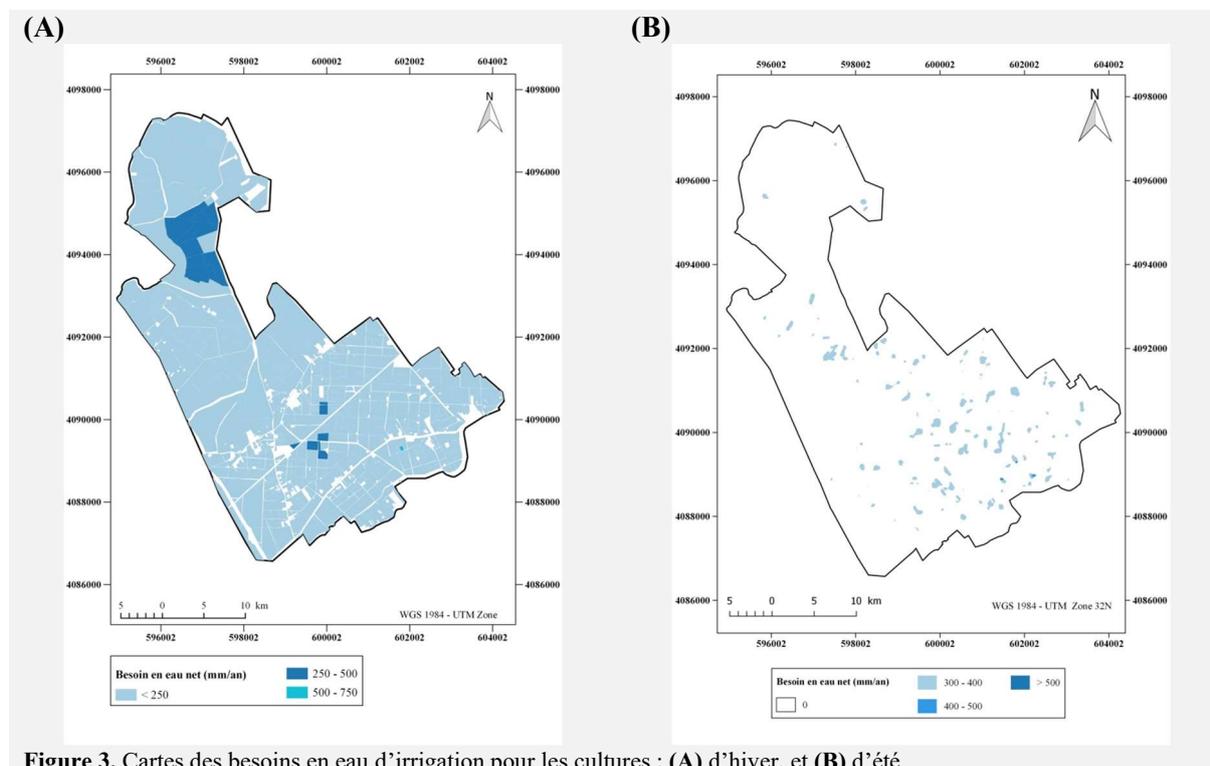
Cependant, les résultats obtenus montrent un écart important entre les superficies des cultures fourragères déclarées notamment pour l'avoine et le Trèfle d'Alexandrie, respectivement, 540 ha et 120 ha, et les superficies renseignées par notre méthode de cartographie, respectivement, 1825 ha et 1003 ha. Il convient de préciser par ailleurs que la conduite du Trèfle d'Alexandrie est couramment considérée en irrigué dans ce périmètre alors que la culture de l'avoine essentiellement en régime pluvial bien que les besoins en eau des deux cultures soient comparables dans la zone d'étude. Des ajustements seraient vraisemblablement nécessaires à notre approche de travail pour le croisement d'informations dont l'évaluation par exemple d'autres méthodes de classification d'occupations des sols appelant à des enquêtes de terrain plus approfondies selon le type de conduite (irrigué ou en pluvial). Néanmoins, les écarts enregistrés pourraient être expliqués également par les limites des techniques d'échantillonnage couramment utilisées par le CRDA. En effet, les techniques adoptées sont mitigées entre les méthodes objectives par relevés et mesures, in situ, lors des campagnes d'hiver ou d'été et les méthodes d'évaluation subjectives à dire d'expert. Dès lors, les résultats des statistiques communiquées sont contrastés et seraient vraisemblablement la résultante d'une compensation subjective entre surestimations et/ou sous-estimations de la mise en valeur agricole réelle par les deux méthodes. De plus, ces statistiques sont souvent communiquées par délégation, ce qui pourrait nous induire à confusion si l'on considère la limite supérieure du PPI en chevauchement avec la délégation de Kalaat El Andalou et certains périmètres irrigués privés. Les résultats obtenus soulèvent la nécessité de repenser tout à la fois les méthodes d'estimation couramment utilisées et les croisements d'informations géographiques indispensables à certaines analyses des périmètres irrigués par les EUT.

3.2. Répartition spatiale des besoins en eau

L'estimation des besoins en eau est extrêmement importante pour satisfaire la demande en eau dans la zone d'étude. Le calcul de ces besoins par le modèle Cropwat 8.0 repose sur la détermination de l'évapotranspiration de référence (ET₀), en se fiant aux conditions pédoclimatiques de la zone d'étude et les classes d'occupation du sol identifiées. L'ET₀ annuelle est estimée à 1119,3 mm durant la campagne agricole 2015/2016. En tenant compte des cartes d'occupation du sol en hiver et en été, élaborées dans la section précédente, et sur la base des méthodes d'estimation des besoins proposées par les bulletins FAO-56 et FAO-25, nous avons déterminé dans un premier temps les besoins en eau totaux et nets annuels pour les cultures hivernales et estivales. Les valeurs des besoins en eau totaux enregistrées, pour les cultures d'hiver, varient entre 108,5 et 570,6 mm/an voire 904 mm/an si l'on considère les besoins annuels de la luzerne (fourrage pérenne alterné) et dont les besoins en eau sont cumulés (besoins en hiver et en été). Il convient de rappeler que les besoins en eau d'irrigation correspondent à des besoins nets. La répartition spatiale des besoins en eau d'irrigation des cultures d'hiver est rapportée dans la figure 3A. Compte tenu des superficies des classes d'occupation du sol,

les besoins nets en eau d'irrigation des cultures d'hiver seraient de l'ordre de 7,32 Mm³ ; le besoin en eau total environ 12 Mm³. Cependant, les besoins estimés en eau d'irrigation couvriraient essentiellement les besoins du trèfle d'Alexandrie (2,03 Mm³) et de l'avoine (4,1 Mm³) puisque ces derniers occupent les superficies les plus importantes d'après la classification des occupations du sol obtenue. Les besoins en eau d'irrigation des cultures d'été (maïs, sorgho, sorgho fourrager) varient entre 323,2 et 481,4 mm/an voire 733,2 mm/an si l'on considère les besoins annuels de la luzerne. La répartition spatiale des besoins en eau des cultures d'été est rapportée dans la figure 3B. Selon les superficies des classes d'occupation du sol, les besoins en eau totaux et nets des cultures d'hiver sont respectivement de l'ordre de 1,81 et 1,69 Mm³. Le sorgho (fourrager) consommerait vraisemblablement l'essentiel de l'eau d'irrigation (1,66 Mm³).

En général, les statistiques des volumes distribués par campagne agricole et par périmètre, sont fournies par les CRDA. Cependant, certaines données lacunaires sont reconstruites à partir de valeurs estimatives des besoins en eau des cultures supposées mises en place, en tenant compte de la superficie irriguée et de la pluviométrie de l'année y afférente. Ceci est principalement lié au fait qu'un certain nombre de périmètres ne disposent pas actuellement de compteurs d'eau ; ça serait vraisemblablement le cas d'environ 1/3 des périmètres irrigués existants. Cependant, lorsque les compteurs sont endommagés par les EUT, il y a facturation à l'heure d'irrigation ou bien forfait d'un volume théorique en fonction de la culture et de la surface. La facturation de l'eau adoptée est généralement de type forfaitaire basée sur les déclarations des agriculteurs ajustables par des relevés des superficies effectivement irriguées lors du suivi et contrôle des secteurs irrigués.



La consommation nationale en eau dans les périmètres irrigués à partir des eaux usées traitées varie fortement selon les années. Le volume moyen global sur la période 2000-2016 serait de l'ordre de 13,4 Mm³/an. Il serait fortement influencé par les volumes exploités à Borj Touil, soit en moyenne 4,12 Mm³/an sur la même période. Afin d'évaluer d'éventuels excès ou bien déficits en termes de consommation d'eau, nous avons comparé nos estimations des besoins en eau par le modèle Cropwat 8.0 avec les volumes de consommation d'eau déclarés par le CRDA pour l'année 2015/2016 (Tableau 1). Il est à rappeler que le mode de distribution local adopté est toujours le même depuis la mise en eau de la zone d'étude à savoir le mode en commande par l'aval basé sur une desserte à la demande. La distribution de l'eau est planifiée en début de chaque campagne agricole par secteur(s) indépendamment des besoins en eau effectifs des cultures emblavées. Au-delà des pratiques d'irrigation existantes ou de distribution de l'eau, nos calculs prennent en considération les différents types d'occupation du sol en hiver et en été et leurs besoins en eau théoriques en fonction des conditions pédoclimatiques locales ainsi que les superficies irrigables y afférentes.

Dans un premier temps, nous avons relevé une sous-facturation des volumes d'eau pompés pour l'irrigation. Ce gap pourrait être imputé à première vue aux techniques d'acquisition des données adoptées soit par relevé direct du compteur d'eau à la station de pompage de Raoued pour déterminer les volumes pompés, soit par une méthode d'estimation subjective des besoins en eau basée sur les déclarations des agriculteurs et l'existant pour évaluer les volumes à facturer. Cependant, les consommations d'eau théoriques et réelles, montrent une différence nette entre les besoins en eau estimés et les volumes réels distribués aux agriculteurs. Pour la période hivernale, nous avons relevé un déficit important en eau d'irrigation. En général, la distribution de l'eau d'irrigation par le CRDA est intermittente et serait vraisemblablement tributaire de la pluviométrie locale indépendamment des besoins totaux ou nets des cultures ou bien des vertus fertilisantes permettant par ailleurs de contribuer à l'amélioration des rendements agricoles. En effet, l'essentiel des plantations hivernales seraient conduites en mode pluvial, complétée vraisemblablement par une irrigation d'appoint selon les types d'exploitations.

Tableau 1. Comparaison des besoins en eau avec la consommation réelle en EUT (en Mm³)

Cultures (2015/2016)	Besoins en eau calculés (en Mm ³)	Consommation réelle (en Mm ³) *		Remarques
		EUT pompées	EUT facturées	
Hivernales	7,32	2,89	1,54	Déficit
Estivales	1,69	3,92	2,42	Excès

* CRDA de l'Ariana

Durant la campagne agricole 2015/2016, les volumes réels réutilisés rapportés à la superficie totale irriguée est de l'ordre de 9950 m³/ha (DG GREE, 2017), ce qui exprime que la consommation est forte sur la superficie effectivement irriguée. D'après nos calculs, si l'on ne considère que la conduite des cultures estivales en irrigué, les besoins en eau rapportés la superficie totale irriguée serait d'environ 3400 m³/ha soit presque trois fois moins élevé. En effet, en se fiant à la consommation réelle en EUT pour la période estivale nous avons relevé un excès en termes d'apport en eau d'irrigation. Ceci est dû à la demande en eau importante et la pression grandissante exercée par les agriculteurs durant la période de pointe estivale, compte tenue des pertes non négligeables engendrées par les réseaux de refoulement et d'adduction anciens et vétustes, mais également les pratiques d'irrigation actuelles peu économes en eau. Bien que l'eau soit le facteur de production le plus déterminant, la technique d'irrigation répandue est l'irrigation gravitaire à la planche ou la submersion. Aucune initiative de réintroduction des techniques modernes de préservation des ressources en eau n'est présente tout au long de la plaine. En effet, le niveau de traitement actuel des EUT ne permet pas l'introduction des techniques modernes d'irrigation (telles que l'irrigation localisée ou l'irrigation par aspersion). Des entretiens fréquents des équipements sont nécessaires, ce qui rend l'activité d'irrigation coûteuse et contraignante au niveau de l'agriculteur. L'aspersion a déjà échoué entre autres en raison de la dégradation de la qualité de l'eau et la disponibilité irrégulière des ressources en eau au fil du temps. Ces deux facteurs ont engendré tout à la fois une pression sur les agriculteurs en diminuant progressivement les superficies exploitées mais également un gaspillage en eau d'irrigation à la parcelle, d'autant plus que la quasi-totalité des exploitants ne disposent pas d'infrastructures appropriées de stockage tampon journalier ou par ailleurs inter-saisonnier (Neubert et Benabdallah, 2003).

Par ailleurs, le coût de vente dérisoire du mètre cube (0,02 DT) instauré depuis 1998 serait un frein aux gestionnaires du secteur public pour améliorer les conditions de valorisation de la réutilisation des eaux usées traitées. Pour la campagne agricole 2015/2016, le coût de revient de l'eau sur la base du coût annuel de renouvellement et des coûts d'entretien et de gestion s'élèverait à 0,958 DT/m³ à Borj Touil (SCP, 2017), soit un taux de recouvrement d'environ 7% (DG GREE, 2017). Les pratiques actuelles dans la zone d'étude sont vraisemblablement à contre-courant des bonnes pratiques couramment admises pour le recyclage agricole des eaux usées traitées et constituent une menace réelle sur la durabilité de ce secteur.

4. Conclusion

L'usage des données de télédétection sur les périmètres irrigués, en l'occurrence avec les eaux usées traitées, est une approche prometteuse pour restituer l'historique des exploitations agricoles à partir des images satellite, mais également appréhender la complexité de la mise en valeur agricole en irrigué et les consommations d'eau ainsi que leurs évolutions spatio-temporelles. En effet, le couplage de l'exploitation des données de la télédétection (Landsat 8 et Sentinel 2) avec des modèles de prévision des besoins en eau d'irrigation (CROPWAT, FAO) permet d'établir tout à la fois les cartes d'occupation

du sol et la distribution spatiale des besoins en eau, et de contribuer dans une certaine mesure à l'établissement des données générales de base pour une meilleure gouvernance locale de l'eau. L'approche adoptée dans le cadre de la présente étude constitue un outil potentiellement très compatible avec les études publiées jusqu'à ce jour sur le diagnostic de l'existant et à l'élaboration des orientations de base du secteur irrigué à partir des EUT, d'ores et déjà entamés dans le cadre du plan national "Water Reuse 2050". Notre méthodologie de travail est facile à adapter pour chaque situation et peut aider, a posteriori, à la prise de décisions préventives. Elle utilise des images gratuites et facilement accessibles et ne nécessite pas d'entrées auxiliaires, et serait donc extensible à tout périmètre irrigué. Cependant, des ajustements seraient vraisemblablement nécessaires à notre approche de travail pour le croisement d'informations dont l'évaluation d'autres méthodes de classification d'occupations des sols et d'estimation des besoins en eau. Néanmoins, les écarts enregistrés à ce stade de travail pourraient être expliqués éventuellement par les limites des techniques d'élaboration des statistiques couramment utilisées par le CRDA, qu'il convient de repenser.

5. Références bibliographiques

- AHT GROUP AG (2009)** Identification et élimination des goulots d'étranglement pour l'utilisation des eaux usées traitées dans le cadre de l'irrigation ou autres usages. Rapport national – Tunisie, Réf. RG/2008-01/FTF, Pays MEDA – Euro Med/BEI, 46 p. Available from: <<https://www.eib.org/attachments/country/study-on-the-reuse-of-wastewater-fr.pdf>>
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998)** Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. Available from: <<http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>>
- Anane M, Limam A, Bouziri L, Jellali S (2012)** Ranking Suitable Sites for Irrigation with Reclaimed Water in the Nabeul-Hammamet Region (Tunisia) Using GIS and AHP-Multicriteria Decision Analysis. *Resources Conservation and Recycling*, 65:36-46. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.05.006
- Anane M, Selmi Y, Limam A, Jedidi N (2014)** Does irrigation with reclaimed water significantly pollute shallow aquifer with nitrate and salinity? An assay in a perurban area in North Tunisia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186: 4367–4390. DOI: 10.1007/s10661-014-3705-x
- Bahri E, Zammouri M, Hachicha M (2015)** Development of a Flow and Transport Model for Drainage Network Conception in Northern Tunisia. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142: 05015006. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000934
- Ben Brahim-Neji H, Ruiz-Villaverde A, González-Gómez F (2014)** Decision aid supports for evaluating agricultural water reuse practices in Tunisia: The Cebala perimeter. *Agricultural Water Management*, 143:113–121. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.07.002
- Ben Brahim-Neji H, Turki SY (2015)** GIS – based multicriteria decision analysis for the delimitation of an agricultural perimeter irrigated with treated wastewater. *Agricultural Water Management*, 162: 78–86. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.08.020
- Bettaibi A, Anane M, Ergaieg K (2018)** Land Use Land Cover Mapping of Borj Touil (Northern Tunisia) Irrigated District with Reclaimed Water Using Landsat-8 and Sentinel-2 Satellite Images. In: *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding* 91: 1787–1789, Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-70548-4_518
- Braudeau E et al. (2001)** Un système d'information pédologique, Le SIR-Sols du périmètre irrigué de Cebala-Borj-Touil (basse vallée de la Medjerda). *Bulletin Sols de Tunisie*, Braudeau E et Mtimet A (Eds.), Direction des Sols, Tunisie.
- BPEH (2019)** Rapport national du secteur de l'eau. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, Tunisie.
- BRL (2019)** Elaboration du plan directeur national de réutilisation des eaux usées traitées en Tunisie « WATER REUSE 2050 », Phase 1 : Diagnostic de la filière et élaboration des orientations de base. Rapport principal, Version 1.1, Réf. A00437, 268 p.
- Congalton RG, Green K (1999)** Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices. Lewis Publishers, Boca Raton.

- DG GREE (2017)** Situation des périmètres irrigués à partir des eaux usées traitées : Campagne 2015/2016. Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche, Tunisie.
- FAO (2009)** Cropwat 8.0 for windows user guide. Rome, Italy. Available from: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>>
- FAO (2018)** The Agricultural Integrated Surveys Programme: AGRISurvey Data Driving Development. Available from: <<http://www.fao.org/3/ca1459en/CA1459en.pdf>>
- Hamdane A (2019)** Tunisia. In Molle F, Sanchis-Ibor C, Avellà-Reus L (Eds.), Irrigation in the Mediterranean: Technologies, Institutions and Policies. Global issues in water policy series (pp. 15-50), Switzerland: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-03698-0_2
- Mehdaoui R, Anane M (2020)** Exploitation of the red-edge bands of Sentinel 2 to improve the estimation of durum wheat yield in Grombalia region (Northeastern Tunisia). International Journal of Remote Sensing, 41:23, 8984-9006. DOI: 10.1080/01431161.2020.1797217
- Neubert S, Benabdallah S (2003)** La réutilisation des eaux usées traitées en Tunisie. Etudes et rapports d'expertise 11/2003, Institut Allemand de Développement, 96 p.
- SCP (2018)** Etude préalable à un plan national 'Réutilisation des eaux usées traitées' pour la Tunisie – Diagnostic de l'existant. Livrable N°1/7 : Etat de l'art de la REUT en Tunisie, Réf. 2017_06_03-TN-DIAG REUSE TUNISIA, 107 p.
- SERAH (2008)** Réhabilitation du périmètre de Cebela Borj-Touil irrigué à partir des eaux usées traitées. Ministère de l'Agriculture, Tunisie.
- Ozdogan M, Yang Y, Allez G, Cervantes C (2010)** Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges. Remote Sensing, 2: 2274-2304. DOI: 10.3390/rs2092274
- SAFI (2013)** Actualisation de l'étude de réhabilitation du périmètre irrigué à partir des eaux usées traitées de CEBELA- Borj Touil. PHASE 1: Actualisation de l'étude de faisabilité. Ministère de l'Agriculture, Tunisie.