Cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala (Algérie) à l'aide des outils d'observation de la terre

Asma Kahli, Ghania Belhadj, Elie Gaget, Clément Merle, Anis Guelmami

▶ **To cite this version:**

Asma Kahli, Ghania Belhadj, Elie Gaget, Clément Merle, Anis Guelmami. Cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala (Algérie) à l'aide des outils d'observation de la terre. Revue d'Écologie, 2018, 73 (4), pp.431-445. hal-02013882

HAL Id: hal-02013882
https://hal.science/hal-02013882

Submitted on 11 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala (Algérie) à l'aide des outils d'observation de la terre

Asma KAHLI[1*], Ghania BELHADJ[2], Elie GAGET[3,4], Clément MERLE[3] & Anis GUELMAMI[3]

[1] Laboratoire Écologie fonctionnelle et évolutive, Université Chadli Bendjedid B. 73, El Tarf, Algérie.
[2] Laboratoire Agriculture et Fonctionnement des écosystèmes, Université Chadli Bendjedid B. 73, El Tarf, Algérie.
[3] Institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes, Tour du Valat, Le Sambuc, 13200 Arles, France.
[4] Muséum National d'Histoire Naturelle, Conservation des Espèces, Restauration et Suivi des Populations - UMR 7204 MNHN-CNRS-UPMC, 55 rue Buffon, 75005 Paris, France.
* Auteur correspondant. E-mail : asmakahli@hotmail.com

SUMMARY.— *Mapping of wet forests using Earth Observation tools in El Kala area (Algeria)*.— Wet forests are among the most threatened and degraded wetland ecosystems in the world. In Algeria, they are mainly represented by specific, fragile and rare forest habitats. The region of El Kala (North-East of Algeria) hosts many unique wetlands (e.g. lakes, marshlands, wet meadows, lagoons, etc.) but also some of the most extended wet forests in North Africa. The main objective of this study is to develop a new mapping approach for the location and the delineation of these ecosystems using Earth Observation (EO) tools. This methodology is based on a combination of topographic and hydro-geomorphological indices derived from Digital Elevation Models (DEMs), with spectral variables extracted from Landsat-8 satellite images and in-situ data collected from the field. The final result showed that the studied area hosts more than 3900 ha of wet forests (alder and riparian forests), with an overall accuracy, estimated using field observations, higher than 85 %.This new approach allows mapping the spatial distribution of wet forests at large geographic scales and could be used as a support to facilitate their monitoring, using EO time series, but also to better implement management and conservation measures.

RÉSUMÉ.— Les forêts humides sont parmi les écosystèmes humides les plus dégradés et les plus menacés dans le monde. En Algérie, elles représentent un ensemble d'habitats forestiers singuliers, fragiles et rares. La région d'El Kala, à l'extrême nord-est du pays, abrite de nombreuses zones humides uniques (lacs, marais, prairies humides, lagunes, etc.), parmi lesquelles quelques-unes des plus importantes formations de forêts humides en Afrique du Nord. L'objectif de cette étude est de développer une nouvelle approche cartographique afin de localiser et de délimiter ces formations à l'aide des outils d'observation de la Terre. Elle se base sur une combinaison d'indices topographiques et hydro-géomorphologiques, issus des Modèles Numériques de Terrain (MNT), de variables spectrales calculées à partir des images Landsat-8 et de données collectées sur terrain. Le résultat final a permis de mettre en évidence l'existence de plus de 3900 ha de forêts humides (aulnaies plus ripisylves) sur l'ensemble des bassins versants de la région d'El Kala, avec un niveau de fiabilité, estimé à partir d'observations terrain, supérieur à 85 %. Ainsi, la méthodologie développée ici permet de définir la distribution spatiale des forêts humides sur de grandes échelles territoriales, ce qui pourrait grandement faciliter leur suivi diachronique, avec des analyses rétrospectives rendues possible grâce aux outils de télédétection, mais aussi une meilleure implémentation des outils dédiés à leur gestion et à leur conservation.

How to cite : Kahli A., Belhadj G., Gaget E., Merle C., Guelmami A. 2018. *Cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala (algérie) à l'aide des outils d'observation de la terre / Mapping of wet forests in El Kala area (Algeria) using Earth Observation tools*. Terre (La) et la vie Revue d'écologie 73:431–445.

Les zones humides sont considérées comme les écosystèmes les plus riches en termes de biodiversité mais, paradoxalement, ce sont aussi ceux qui subissent le plus de pressions anthropiques. En effet, malgré le fait qu'elles rendent des services inestimables à la société (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), de nombreuses menaces pèsent sur elles et leur perte se fait à un rythme plus rapide que pour la plupart des autres types d'écosystèmes (Finlayson *et al.,* 1992). En région méditerranéenne, ces pressions se font surtout sentir sur la disponibilité en eau (Plan Bleu, 2009), en privant ces milieux de cette ressource essentielle pour leur fonctionnement, par des pompages excessifs, la construction de barrages, ou encore sur la perte de leurs habitats (Pérennou *et al*., 2012), en les drainant au profit de l'agriculture par exemple (Atlas IV, 2004).

Pour Couillard & Grondin (1986), les milieux humides regroupent l'ensemble des sites saturés d'eau ou inondés pendant une période suffisamment longue pour influencer, dans la mesure où elles sont présentes, les composantes « sol » et « végétation ». Selon une définition plus large (Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2016), ces milieux regrouperaient toutes « les étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ». En milieu forestier, les zones humides sont souvent synonymes de milieux riverains, étant donné que ceux-ci sont généralement étroitement associés aux lacs, aux étangs et aux cours d'eau (Bertrand, 2007). Le terme « forêt humide » évoque souvent les grandes forêts tropicales. Cependant, dans cette étude, il s'agit plutôt des forêts humides de type européen où, selon Pichard (2004) et Bournérias *et al*. (2001), deux grands types sont à distinguer : les ripisylves, qui sont des formations boisées associées à un cours d'eau, étirées le long de ses berges, qui revêtent des physionomies variées selon leur composition floristique ; et les forêts marécageuses, de surface généralement limitée, se trouvant dans les dépressions où les sols sont inondés et/ou gorgés d'eau de manière permanente ou temporaire.

Avec leurs faciès multiples, ces formations boisées présentent un grand intérêt et sont susceptibles d'assurer un certain nombre de fonctions écologiques, telles que l'amélioration de la valeur du paysage (Dufour & Piégay, 2006) et le déplacement des espèces faunistiques (Pichard, 2004 ; Massenet, 2014). Ces milieux fournissent également de nombreux services écosystémiques aux populations humaines : rétention des métaux lourds et des toxines, amélioration de la qualité de l'eau, prévention de l'érosion des sols, récréation, atténuation des effets des inondations à l'aval (vitesse et intensité des crues), recharge des aquifères, productivité secondaire (notamment piscicole) et approvisionnement en bois (Dufour & Piégay, 2006 ; Massenet, 2014).

En Algérie, les forêts humides se rencontrent souvent dans les parties nord du pays, là où les conditions climatiques, édaphiques et hydrogéologiques le permettent, notamment à l'extrême nord-est du pays, dans la région d'El Kala, où la flore présente de grandes similitudes avec celle des forêts humides d'Europe moyenne et en serait même la dernière relique en Afrique du Nord (Bensettiti & Lacoste, 1999). En effet, leur préservation a été favorisée par des conditions géomorphologiques et climatiques particulières qui ont permis leur développement et le maintien de leur biodiversité (De Bélair, 1990 ; Bensettiti, 1992, 1995 ; Samraoui *et al.,* 1992 ; Samraoui & De Bélair, 1994 ; Véla & Benhouhou, 2007).

D'une manière générale, l'étude des écosystèmes humides, en particulier les forêts humides, est une tâche souvent ardue et complexe, principalement à cause de la difficulté d'accès propre à ces milieux qui sont régulièrement, voire en permanence, inondés (Kerr & Ostrovsky, 2003). En outre, il existe un réel besoin de mieux connaître ces habitats et de comprendre leurs structures, leur fonctionnement ainsi que les rôles qu'ils peuvent jouer, afin de mieux orienter les efforts de gestion, de conservation, de restauration et de protection, notamment en région méditerranéenne (MWO, 2012). Dans ce contexte, le recours aux méthodes de prospection à distance, telles que celles basées sur les outils d'observation de la Terre, s'est progressivement standardisé et les résultats issus de ces approches commencent à prendre une place de plus en plus importante dans les processus de gestion des habitats naturels de manière générale, en complément aux données terrain (Lucas *et al.,* 2015). Toutefois, il existe à l'heure actuelle peu de techniques dédiées au suivi des forêts humides méditerranéennes. De ce fait, l'objectif principal de cette étude sera de développer une méthodologie,

basée sur les outils d'observation de la Terre couplés à des données *in-situ*, pour la localisation et la délimitation de ces formations dans la région d'El Kala.

MATÉRIELS & MÉTHODES

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le complexe de zones humides d'El Kala est situé à l'extrême nord-est algérien. Il appartient à l'Atlas tellien Nord oriental. Il est limité à l'ouest par l'oued Seybouse, au nord par la mer Méditerranée, au sud par les monts de la Medjerda et

à l'est par les montagnes de la Khroumirie (Belhadj, 2008). L'oued El Kébir, qui circule entre deux ensembles de cols et de vallons transversaux, est à l'origine d'une série de petites plaines orientées d'est en ouest, dont la superficie se réduit graduellement à l'approche de sa source située en Tunisie et où les altitudes sont comprises entre 288 et 396 m. En arrière du rivage, ces plaines sont cernées par un long cordon dunaire du côté de la mer et par une succession de montagnes vers l'intérieur. Les eaux de ruissellement de plusieurs bassins et sous-bassins versants tendent à s'accumuler, d'où la présence de plusieurs habitats humides de typologie variée qui forment le grand complexe de zones humides d'El Kala, parmi lesquelles les plus importantes forêts humides d'Algérie (De Bélair, 1995).

La zone d'étude est définie par l'ensemble des sous-bassins versants entourant ce complexe (Fig. 1). Le choix de travailler à cette échelle s'est fait dans le but d'intégrer une approche écosystémique, afin de mieux cerner certaines des variables environnementales (tel le ruissellement des eaux de surface) qui expliqueraient la répartition spatiale des forêts humides dans cette région. Les limites des sous-bassins versants utilisées proviennent de la base de données HydroBASINS Version 1.b niveau 12 (Lehner, 2012).

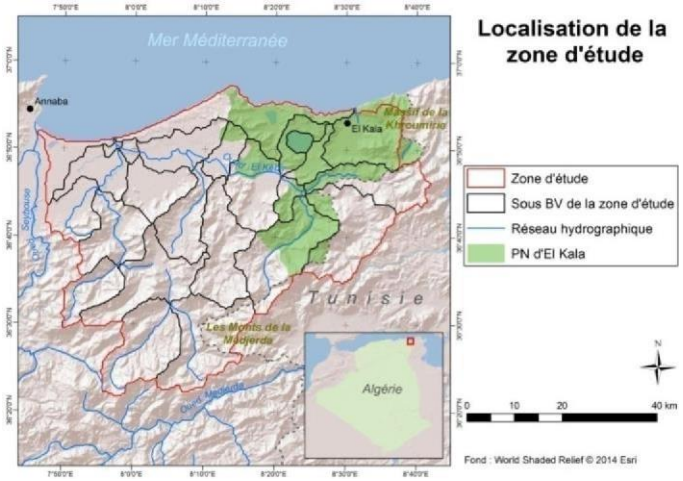

Figure 1.—Localisation de la zone d'étude composée de l'ensemble des sous-bassins versants entourant le complexe de zones humides de la région d'El Kala (BV : Bassin Versant et PN : Parc National).

La zone d'étude est sous l'influence d'un climat méditerranéen, à fort contraste saisonnier (pluvieux en hiver et sec en été) et est considérée comme l'une des régions les plus pluvieuses de la frange littorale maghrébine, recevant chaque année en moyenne entre 700 et 900 mm de pluie (Boukhroufa, 2017). Deux phénomènes météorologiques conditionnent cette forte pluviosité : les perturbations cycloniques d'origine atlantique, de l'ouest et du nord-ouest d'une part et les dépressions qui prennent naissance en Méditerranée occidentale, d'autre part (De Bélair, 1990). De plus, sa situation littorale mais aussi l'existence de nombreuses zones humides (naturelles et artificielles) entraînent une importante évaporation et les vents nord-ouest (dominants en hiver) sont souvent porteurs d'humidité et tout ceci génère, également, de fortes précipitations (De Bélair, 1995 ; Boukhroufa, 2017).

CHOIX DES DONNÉES UTILISÉES

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont, pour l'essentiel, acquises avec les techniques d'observation de la Terre. Elles permettent d'étudier certaines conditions biotiques et abiotiques observées à la surface de la Terre, en particulier la surface du sol, la topographie, l'hydrologie, le couvert végétal et l'utilisation des terres (Jensen, 2007).

Les images satellites utilisées sont issues de la collection Landsat 8 OLI/TIRS Level-2 (30 m de résolution spatiale), acquises via le portail web Earth Explorer de l'USGS (*United States Geological Survey*). Cette plateforme permet d'obtenir des données Landsat prétraitées, avec la transformation des valeurs spectrales en réflectance de surface, ce qui offre la possibilité de les exploiter sans opérer de corrections préalables. La période analysée correspond à l'année 2015, avec 7 dates utilisées couvrant l'ensemble des saisons (heures des prises de vue : 10h06

GMT) : le 04 janvier, le 10 avril, le 12 mai, le 29 juin, le 15 juillet, le 03 octobre et le 22 décembre. En plus des images L8, d'autres données d'observation de la Terre ont été utilisées dans le cadre de ce travail, telles celles du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM 1 arc-s Global DEM (*Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc-second*) à 25-30 m de résolution.

L'ensemble des analyses spatiales sur les données vectorielles et les rasters ont été réalisées avec les logiciels ArcGIS 10.3 et ENVI 4.7 et les traitements statistiques avec le logiciel R v3.3.0 (*R Development Core Team* 2015).

ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES TERRAIN

Les informations issues des observations terrain ont été récoltées lors de deux campagnes menées au début et à la fin de l'étude. La première (mars 2016) consistait à délimiter cinq formations de forêts humides connues à l'aide de relevés *in-situ* avec un GPS. Une fois ces informations acquises, elles ont été reportées sous SIG afin de créer une couche de référence (Fig. 2). Celle-ci servira, notamment, au seuillage des différentes variables pour la délimitation des forêts humides dans l'ensemble du territoire étudié.

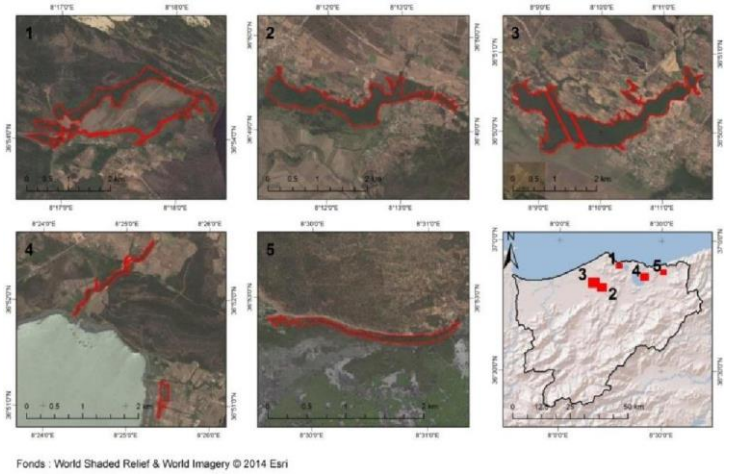

Figure 2.— Délimitation des cinq formations de forêts humides ayant servi au seuillage et au calibrage des indices: 1) ripisylve au bord de la lagune d'El Mellah ; 2) aulnaie d'Oum Laagareb ; 3) aulnaie de Righia ; 4) ripisylve au bord du lac Oubeïra ; 5) ripisylve au bord du lac Tonga.

La deuxième campagne de terrain s'est déroulée entre mars et avril 2017. Elle consistait à récolter un certain nombre d'informations (types d'habitat, classe d'occupation du sol selon la typologie CORIME Land Cover et végétation dominante pour les forêts humides), à partir des observations *in-situ* au niveau de 837 points répartis sur l'ensemble du territoire étudié. Ces observations ont été effectuées dans un rayon de 15 m autour de chaque point afin de mieux correspondre aux résolutions spatiales des données satellitales utilisées (les images L8 et le MNT SRTM 1arc-s GDEM, les deux à ~30 m). Elles ont été complétées par des photo-interprétations sur les images Google Earth, où les mêmes informations ont été notées pour 924 points supplémentaires (Fig. 3).

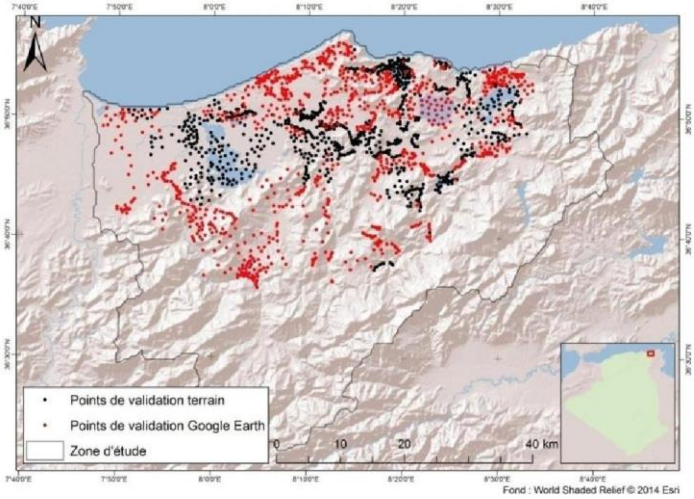

Figure 3.— Localisation des 1761 points d'observation utilisés pour la validation du résultat cartographique.

TRAITEMENTS DES IMAGES SATELLITALES L8

Les valeurs des bandes spectrales dans le visible et le Proche-Infrarouge (PIR), plus celles de deux indices de végétation, ont été extraites de l'ensemble des images acquises pour les pixels des forêts humides délimitées sur le terrain. L'hypothèse est que la dynamique phénologique de la végétation de ces milieux, notamment celle caractérisée par la présence d'eau, serait différente de celle des autres habitats. Ainsi, des analyses statistiques sur les moyennes annuelles de ces variables ont été effectuées et elles devraient aider à identifier celles qui seraient les mieux adaptées pour séparer les forêts humides des autres types d'habitats, dans un premier temps, et de définir les seuils à appliquer afin de les classifier et de les délimiter sur l'ensemble du territoire dans un second temps.

Bandes spectrales et indices de végétation (NDVI et MSAVI2)

Les trois spectres du visible ont été utilisés pour l'extraction des valeurs. Ils correspondent aux bandes B2 (0.45-0.51 µm), B3 (0.53-0.59 µm) et B4 (0.64-0.67 µm) dans les images L8 (respectivement, le Bleu, le Vert et le Rouge). En plus de ces 3 bandes, celle du PIR a également été échantillonnée (bande B5 : 0.85-0.88 µm) sur chacune des images. Cette dernière est sensible à la structure des couverts végétaux, distingue bien les résineux des feuillus, ou encore les milieux ravagés par le feu (CSE, 1996 ; Lebœuf *et al.*, 2015).

L'indice de végétation par différence normalisé (ou NDVI) est construit à partir des canaux Rouge (R) et PIR (Rouse *et al.*, 1973) :

$$NDVI = (PIR - R) \div (PIR + R) \quad (1)$$

Il est sensible à la vigueur (quantité de chlorophylle dans les feuilles) et à la densité de la végétation. Ses valeurs sont comprises entre -1 et +1 et les valeurs négatives correspondant, généralement, aux surfaces autres que les couverts végétaux. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 ; les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses (Rouse *et al.,* 1973).

Le *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index 2* ou MSAVI2 (Bradley *et al.*, 2004) est un indice de végétation dérivé du *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index* ou MSAVI (QI *et al.,* 1994), lui-même dérivé du *Soil-Adjusted Vegetation Index* ou SAVI (Huete, 1988). L'avantage de ces indices est qu'ils prennent en compte l'influence de la nature des sols et du taux de recouvrement de la végétation. Ils sont donc faiblement sensibles aux changements de nature du sol. Le MSAVI2 se distingue par le fait qu'il ne nécessite pas de connaissances préalables sur le site (réponse des sols, taux de couverture végétale) et est donc facilement applicable dans des contextes géographiquement différents (Bradley et *al.*, 2004).

$$MSAVI2 = [((2*PIR) + 1) - \sqrt{((2*PIR + 1)^2 - 8*(PIR - R))}] \div 2 \quad (2)$$

L'intérêt d'utiliser ici ces indices de végétation est surtout de pouvoir distinguer la végétation des forêts humides des autres types de végétation naturelles ainsi que des milieux agricoles.

Cartographie des dynamiques des eaux de surface et définition d'un masque « Eau libre »

Les zones inondées ont été délimitées sur chaque image L8 grâce à l'indice MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), développé par Xu (2006). C'est un dérivé du *Normalized Difference Water Index* ou NDWI (Gao, 1996) qui utilise la bande Moyen-Infrarouge ou MIR (1.57-1.65 µm pour MIR-1 de L8) au lieu du PIR. Cela permet de réduire et/ou de supprimer certains bruits générés par les sols, la végétation et l'urbain qui existent dans le NDWI (Xu, 2006). De plus, le seuillage de cet indice (ici à 0) permet de reclasser les pixels de chaque image en deux valeurs 0 et 1 (où 1 correspond aux surfaces inondées) :

$$MNDWI = (1 - (MIR \div Vert)) \div (1 = (MIR \div Vert)) \quad (3)$$

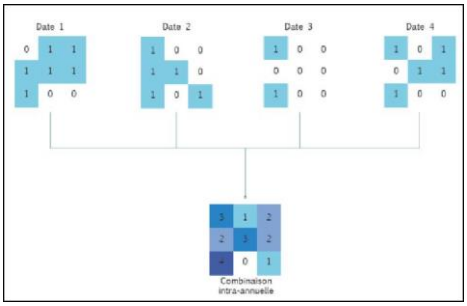

Figure 4.— Addition pixel à pixel des résultats du MNDWI et détermination des dynamiques spatiotemporelles de l'inondation de surface en milieu ouvert. Les degrés de submersion varient de 0 (jamais inondé) à N (inondé en permanence) où N correspond au nombre d'images utilisées.

Ainsi, il est possible de combiner l'ensemble des résultats calculés avec la formule précédente et de cartographier les dynamiques spatiotemporelles de l'inondation de surface pour l'hydro-période étudiée (Davranche, 2008 ; Davranche *et al,*
2013). En effet, l'addition des rasters binaires (0 ou 1), pixel à pixel, permet de créer une seule carte représentant les niveaux d'eau de surface pour l'année 2015 (Fig. 4). Ceci permettra, par la suite, de définir l'étendue maximum de la superficie inondée durant cette hydro-période et de créer un masque « Eau libre » (l'ensemble des pixels ayant été inondés au moins une fois sur les images de 2015 utilisées).

Cependant, il faut noter que le MNDWI ne permet de distinguer que les milieux inondés ouverts et/ou avec peu de végétation sur chaque image individuelle. Autrement dit, les zones en eau mais avec un couvert végétal dense ne sont pas bien repérées et certaines zones en eau, lorsqu'elles sont couvertes par de la végétation émergente, pourraient apparaître comme étant exondées. Néanmoins, l'approche multi-date permettrait d'atténuer légèrement cet effet, du moins pour la végétation aquatique émergente se trouvant sous l'eau une partie de l'année (Gastal, 2016 ; Pérennou *et al*., 2018).

De ce fait, l'intérêt d'utiliser ce résultat ici (le masque « Eau libre ») sera de pouvoir séparer les forêts humides de certains autres milieux humides plus ou moins ouverts (tels que les lacs, les lagunes ou encore les marais). En effet, même si tous ces types d'habitats sont caractérisés par la présence d'eau de surface (de manière permanente ou temporaire), l'hypothèse serait que la probabilité de rencontrer des forêts humides dans les zones ouvertes et inondées soit très faible, étant donné que les conditions écologiques (profondeur de l'eau, salinité, type de sol, etc.) y seraient peu favorables pour leur occurrence (Clerici, 2013).

Variables topographiques

À partir du MNT SRTM G-DEM 1 arc-s, trois variables topographiques ont été calculées sur l'ensemble de la zone d'étude : l'altitude (Alt), la Pente et la distance aux cours d'eau (RivDist).

L'altitude et la pente sont extraites directement à partir du MNT (respectivement en mètres et en degrés). La combinaison de cette dernière avec le réseau hydrographique linéaire (extrait à partir du MNT aussi), a permis de calculer les distances aux cours d'eau en fonction de la topographie. Ce qui a également permis de définir les plaines alluviales le long des corridors fluviaux (appelées aussi zones riveraines), là où les connexions aux nappes souterraines sont généralement plus importantes (Clerici, 2013).

TRAITEMENTS STATISTIQUES

Une identification des variables les plus discriminantes pour les forêts humides a été réalisée dans un premier temps, afin de définir les variables d'intérêt. À cet égard, une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer quelles variables discriminent le mieux ces milieux, avec en variable réponse la valeur des pixels et en effet fixe le type d'habitat, préalablement renseigné par les délimitations *in-situ* pour les forêts humides (réalisées lors de la première campagne terrain) et par les données extraites de la carte d'occupation et d'utilisation des sols de la région d'étude (données fournies par la Direction Générale des Forêts en Algérie). Les différences deux-à-deux entre les modalités d'habitat ont été évaluées par un test *post-hoc* de Tukey-HSD. Étant donné l'hétérogénéité spatiale des milieux échantillonnés et les biais lié aux différences de surfaces échantillonnées, un bootstrap a été utilisé pour estimer la robustesse de l'ANOVA (999 répétitions sur 1000 pixels sélectionnés aléatoirement).

Par la suite, un arbre de classification a été appliqué sur les variables spectrales qui seraient les plus discriminantes, selon les résultats de l'ANOVA. Cette analyse a permis, notamment, de définir les seuils de valeurs pour la délimitation des forêts humides.

CARTOGRAPHIE DES FORÊTS HUMIDES ET VALIDATION DES RÉSULTATS

Le calcul et la combinaison des variables ont été faits à l'aide des logiciels ArcGIS 10.3 et ENVI 4.7 et le rendu final est une cartographie (sous format raster, mais aussi vectoriel) localisant et délimitant les forêts humides sur l'ensemble du territoire étudié.

Enfin, les données collectées au niveau des points d'observation, lors de la seconde campagne terrain (cf. Fig. 3), ont été utilisées pour la validation des résultats et l'estimation des taux d'erreur à l'aide d'une matrice de confusion.

RÉSULTATS & DISCUSSION

CHOIX DES VARIABLES ET DÉFINITION DES SEUILS

Selon les résultats de l'ANOVA et des tests post-hoc associés, le PIR semble être la seule variable spectrale à bien discriminer les forêts humides des autres habitats échantillonnés ($p < 0.05$, Tab. I). Cependant, les indices MSAVI2 et NDVI discrimineraient également bien les forêts humides des autres habitats, mis à part pour les milieux agricoles. Ce sont donc ces trois variables spectrales qui ont été retenues pour la suite des analyses.

Variables spectrales

L'arbre de classification, appliqué seulement aux variables spectrales sélectionnées précédemment, a permis de définir les seuils pour chacune d'entre elles, séparant les forêts humides des autres types d'habitats (Tab. II, Fig. 5).

TABLEAU I

Moyennes des p-values des tests de comparaisons post-hoc après ANOVA entre les forêts humides et les autres habitats

(999 répétitions)

Variables		Agriculture	Forêts	Marais sans végétation	Lagunes	Marais avec végétation	Lacs	Nombre d'habitats discriminés
Spectrales	Bleu	**0.001**	0.521	**<0.001**	0.669	**0.001**	**<0.001**	4
	Vert	**0.017**	0.291	**<0.001**	0.552	**0.001**	0.056	3
	Rouge	0.702	0.168	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	4
	PIR	**0.000**	**0.012**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	6
	NDVI	0.073	**0.029**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	5
	MSAVI2	0.296	**0.046**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	5
Topographiques	Alt	**<0.001**	**<0.001**	0.973	0.935	0.953	**1.000**	2
	Pente	**<0.001**	**<0.001**	0.645	0.130	0.157	**0.050**	3
	RivDist	**<0.001**	**<0.001**	1.000	0.982	0.999	**1.000**	2

TABLEAU II

Structure de l'arbre de classification appliqué aux variables spectrales PIR, NDVI et MSAVI2 avec des seuils définis à l'aide des pixels échantillonnés sur les parcelles de forêts humides délimitées in-situ

Paramétrage	Nœud	Objets	Variable de séparation	Valeurs	Pureté
Méthode : CHAID	1	1406			99.29%
Mesure : Pearson	2	338	NDVI	[0.25; 0.71[	97.58%
Profondeur maximale de l'arbre : 3	3	435	NDVI	[0.71; 0.77[	98.81%
Niveau de signification (%) : 5	4	382	NDVI	[0.77; 0.79[	99.71%
Seuil de séparation (%) : 5	5	251	NDVI	[0.79; 0.83[	99.82%
Autoriser la re-division : Correction de Bonferroni	6	320	MSAVI2	[0.29; 0.84[	96.50%
Seuil de regroupement (%) : 5	7	18	MSAVI2	[0.84; 1[	100.00%
Taille minimale pour un parent : 2	8	309	PIR	[0.27; 0.51[	97.73%
Taille minimale d'un fils : 1	9	11	PIR	[0.51; 0.51[	91.44%
Nombre d'intervalles : 10	10	233	PIR	[0.42; 0.51[	100.00%
Graine (nombres aléatoires) : 4401434	11	179	PIR	[0.51; 0.51[	99.46%
	12	23	PIR	[0.51; 0.59[	97.00%
	13	261	PIR	[0.51; 0.51[	100.00%
	14	101	PIR	[0.51; 0.59[	99.01%
	15	20	PIR	[0.59; 0.59[	100.00%
	16	100	MSAVI2	[0.89; 1[	98.30%
	17	1	MSAVI2	[1; 1[	100.00%

.

Selon les résultats de cette analyse (Fig. 6), ces variables ont permis de bien séparer les forêts humides des autres milieux, en particulier des masses d'eau ouvertes telles que les lacs, les marais et les lagunes. Cependant, on note encore quelques confusions avec d'autres habitats humides,
notamment ceux caractérisés par la présence de végétation aquatique (compte tenu des réponses spectrales pouvant parfois être très proches).

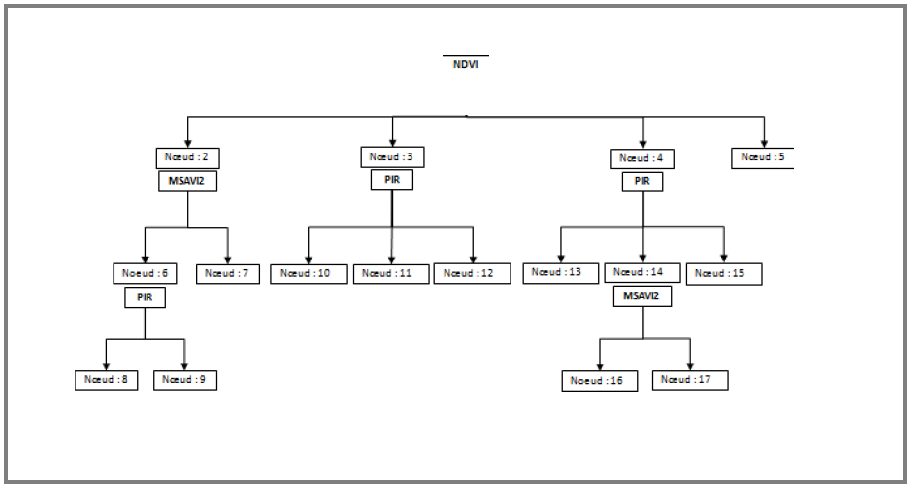

Figure 5.— Structure de l'arbre de classification

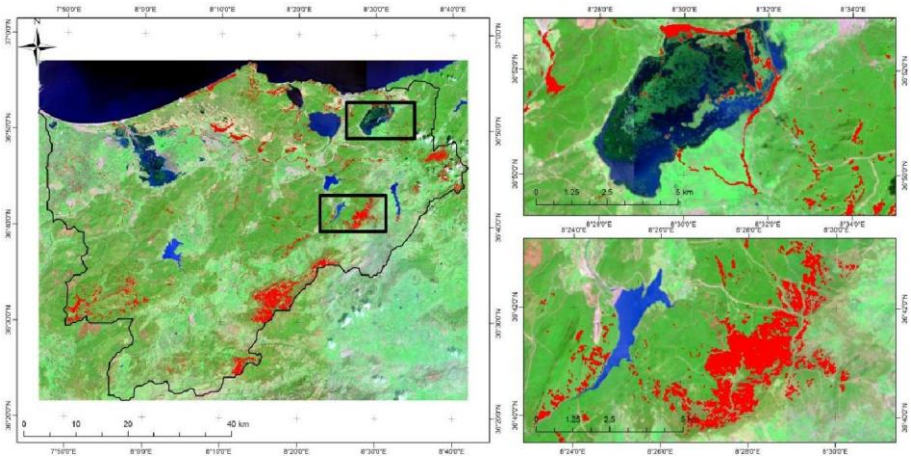

Figure 6.— Résultats de la classification séparant les forêts humides (en rouge) des autres types d'habitats dans la région d'El Kala (à gauche) et exemples de confusions avec la végétation aquatique (Lac Tonga, en haut à droite), ainsi qu'avec d'autres formations forestières (en bas à droite).

S'agissant des habitats non humides, malgré quelques erreurs de confusion qui subsistent encore, l'utilisation de ces variables a bien permis de délimiter les forêts humides et de les distinguer de la majorité de ces milieux, y compris des forêts sèches (Fig. 7).

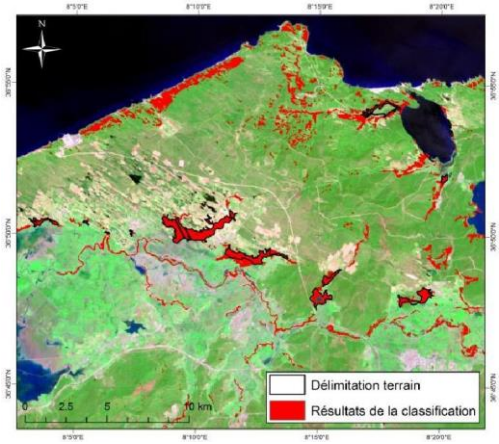

Figure 7.— Comparaison des résultats de la classification des forêts humides dans la région d'El Kala (par arbre de classification sur les 3 variables spectrales PIR, NDVI et MSAVI2) avec les délimitations terrain. À noter les quelques confusions qui subsistent encore, notamment avec certaines formations de végétation sclérophylle, le long du cordon littoral au nord de la zone d'étude.

En effet, leur capacité à différencier les forêts humides des autres formations forestières, en particulier les indices NDVI et MSAVI2 qui sont sensibles aux dynamiques intra-annuelles de la végétation, s'expliquerait par la composition des essences dominantes de ces deux types d'habitats : les forêts humides sont caractérisées par la présence d'espèces caduques. Pour les forêts marécageuses, la strate arborescente est, pour sa majorité, formée d'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*), dans les peuplements purs, et associé au Frêne (*Fraxinus angustifolia*), à l'Orme (*Ulmus minor Miller*) et aux saules (*Salix pedicellata* et *Salix alba*) dans les peuplements mixtes

(Belouahem-Abed, 2012). Quant aux ripisylves, elles comprennent, selon Décamps & Décamps (2002), des Peupliers blancs (*Populus alba*) et noirs (*Populus nigra*), des Frênes à feuilles étroites (*Fraxinus angustifolia*), des Ormes (*Ulmus minor* Miller) et, plus rarement, des Aulnes glutineux, des Saules blancs (*Salix alba*) ou encore du Chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) dans les stations fraîches ou d'altitude. Tandis que les forêts sèches sont caractérisées par des espèces sempervirentes (BNEDER, 2008),

majoritairement formées par du Chêne liège (*Quercus suber*), du Pin maritime (*Pinus pinaster*), de l'Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) et un maquis de Chêne kermès (*Quercus coccifera*). Cette différence de composition se traduit par une dynamique phénologique intra-annuelle contrastée entre les forêts humides et les forêts sèches et ceci se reflète un peu sur les valeurs moyennes du PIR, mais surtout sur celles des indices de végétation NDVI et MSAVI2 (Fig. 8). En effet, ces dernières chutent pour les forêts humides durant la période automne/hiver (probablement en lien avec la perte des feuillages), et atteignent même des valeurs inférieures à celles des forêts sèches. Puis, à partir du mois de février, on note une nette augmentation des moyennes de ces indices, où elles dépassent largement celles des forêts sèches pour la période printemps/été (en particulier le MSAVI2). En revanche, celles-ci (les forêts sèches) enregistrent une variation annuelle des moyennes NDVI et MSAVI un peu plus stable, étant donné que la plupart des espèces qui les composent conservent leurs feuillages durant toute l'année.

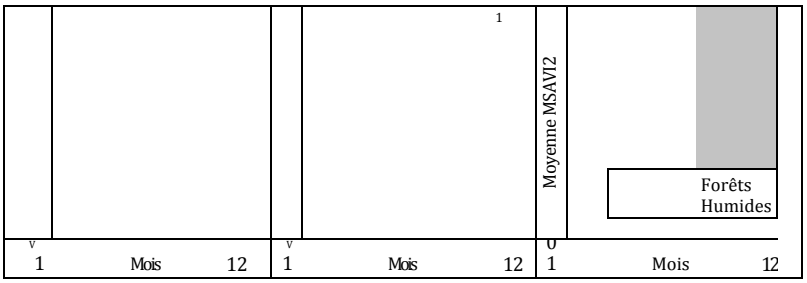

Figure 8.— Dynamiques phénologiques intra-annuelles des forêts humides et des forêts sèches, représentées ici par les valeurs moyennes du PIR (réflectance TOA) et des indices de végétation NDVI et MSAVI2 (valeurs calculées pour chaque image mensuelle à partir des pixels des parcelles échantillonnées pour ces deux habitats, sur l'ensemble de la zone d'étude).

Cependant, il est clair que les variables spectrales seules ne suffisent pas à délimiter les forêts humides avec précision. Des erreurs de confusion subsistent encore, notamment avec les autres types de végétation naturelle sèche, tels que les forêts et la végétation sclérophylle des maquis (cf. Figs 6 & 7). La prise en compte d'autres paramètres (topographie et dynamiques des eaux de surface) semble donc nécessaire afin d'améliorer ce résultat.

La topographie

Seule la variable RivDist a été retenue, au vu de sa pertinence pour la cartographie des forêts humides. En effet, celle-ci intègre déjà la pente (avec son pouvoir discriminant, en particulier vis-à-vis des forêts sèches et des milieux agricoles) et permet d'envelopper spatialement l'ensemble de ces écosystèmes, au regard des facteurs hydrologiques influant sur leur structure et leur fonctionnement, notamment avec la prise en compte des entités linéaires, telles que les ripisylves, dont la présence est conditionnée à la celle des eaux souterraines, en connexion avec les lits des rivières (NRC, 2002).

Compte tenu de sa spécificité (augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne des cours d'eau), cette variable a été plutôt utilisée pour définir un masque, avec le calcul d'un seuil correspondant à la limite de présence de ces habitats. Autrement-dit, au-delà de cette valeur, leur occurrence serait très peu probable (Fig. 9). Ce seuil a été fixé à 359 m, coïncidant avec la distance à laquelle se trouvent 99 % des forêts humides délimitées sur le terrain.

Enfin, étant donné que cette variable définit, de manière plus large, toutes les zones de plaine, le masque précédent intègre aussi l'essentiel des zones humides alluviales (telles que les marais alluviaux et les prairies humides), certaines masses d'eau liées au réseau hydrographique (ex. les barrages et les réservoirs) ainsi que tous les milieux cultivés et les zones imperméabilisée (le bâtis) se trouvant au sein de cette enveloppe. Il est donc primordial de l'associer aux autres paramètres (végétation et inondation de surface) afin de localiser et de délimiter les forêts humides de manière plus précise.

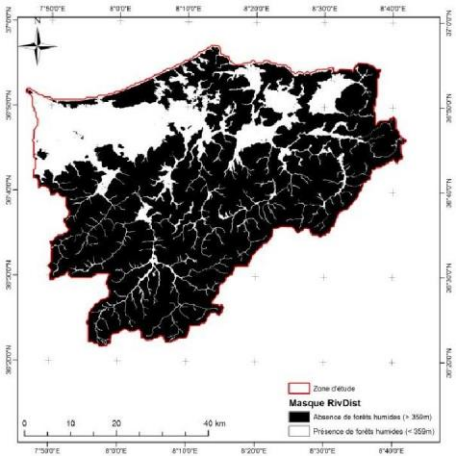

Figure 9.— Délimitation de la zone riveraine et des plaines alluviales où se trouvent 99 % des forêts humides, selon le critère topographique basé sur la distance aux cours d'eau (seuil = 359 m).

Surfaces inondées

Le calcul des indices MNDWI (image par image) a permis de cartographier la dynamique spatiotemporelle des eaux de surface pour l'année 2015 (Fig. 10).

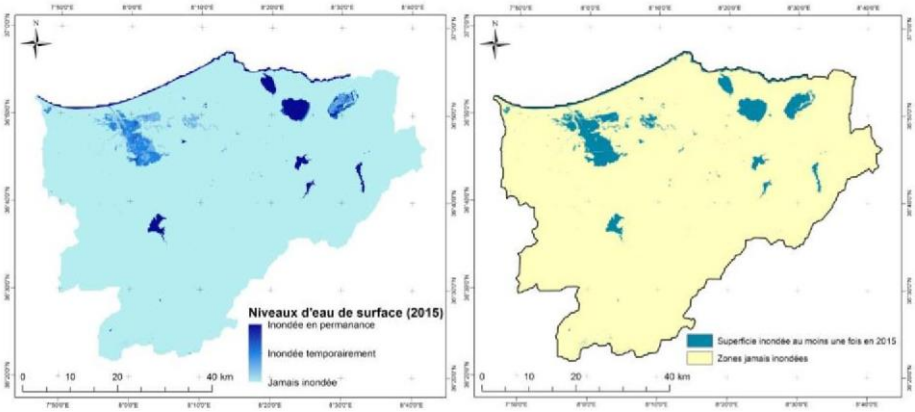

Figure 10.— Dynamique spatiotemporelle des eaux de surface pour l'année 2015 dans la région d'El Kala (à gauche) et définition d'un masque « Eau libre » représenté par le maximum d'inondation (à droite).

Ces résultats ont permis de définir un masque « Eau libre » qui sera également utilisé par la suite pour corriger certaines erreurs de classification des forêts humides, en réduisant les confusions avec d'autres milieux humides inondés de manière permanente et/ou temporaire (essentiellement les marais avec ou sans végétation, les prairies humides, les cours d'eau, les lacs naturels, les lagunes et les barrages et réservoirs).

DÉLIMITATION ET CARTOGRAPHIE DES FORÊTS HUMIDES : COMBINAISON DES VARIABLES

La combinaison des trois derniers résultats, issus de la classification des variables spectrales, de la définition de l'enveloppe des zones riveraines et des plaines alluviales et du calcul masque « Eau libre » (Fig. 11), a permis de localiser, de délimiter et de cartographier les forêts humides sur l'ensemble de la zone d'étude.

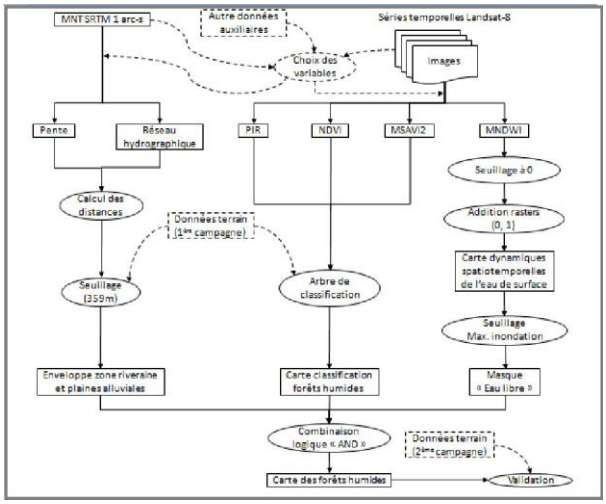

Figure 11.— Schéma de la démarche méthodologique représentant les traitements effectués sur les données brutes et la combinaison entre les produits intermédiaires ayant servi à la cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala.

Selon le résultat final (Fig. 12), la surface totale des forêts humides dans la région d'El Kala serait estimée à 3924 ha, dont environ 42 % représentés par les aulnaies de Righia (313 ha), d'Oum Laagareb (221 ha), de Bourdim (123 ha) et d'Aïn Khiar (95 ha) et les ripisylves de la lagune d'El Mellah (400 ha), des marais de la Mekhada (197 ha) et des lacs Tonga (167 ha) et Oubeïra (131 ha).

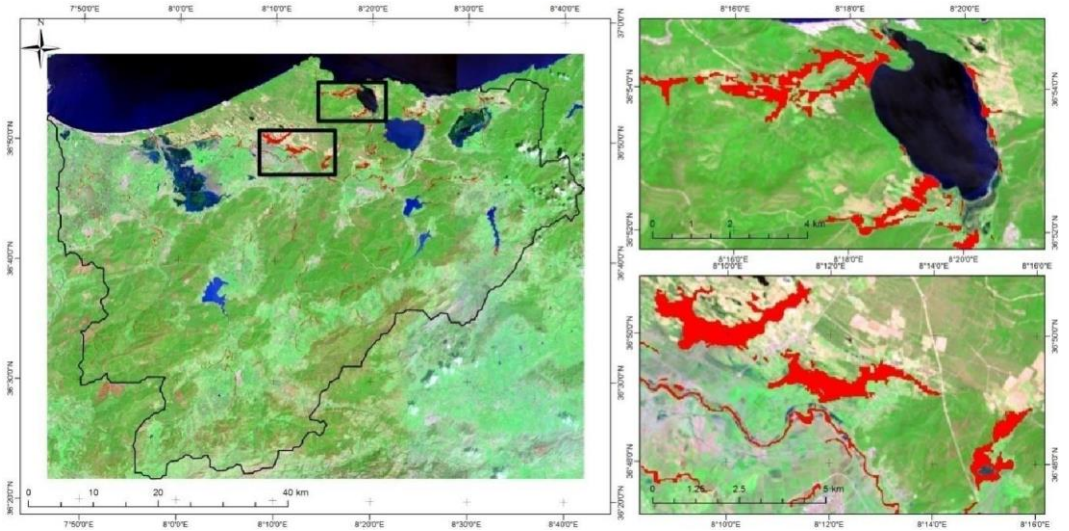

Figure 12.— Cartographie des forêts humides dans la région d'El Kala après combinaison des variables spectrales et topographiques (année 2015).

En conclusion, même si les capacités discriminatoires de chacune des variables utilisées individuellement étaient relativement élevées (cf. résultats de l'ANOVA), leur utilisation combinée s'est avérée nécessaire car cela a permis d'améliorer la localisation des forêts humides, en atténuant le biais

lié à la confusion avec les autres habitats, et d'affiner leur délimitation en prenant en compte leurs spécificités phénologiques et les conditions environnementales nécessaires à leur développement.

VALIDATION DU RÉSULTAT FINAL

Les résultats de la matrice de confusion (Tab. III) indiquent des pourcentages d'erreur de 15,96 % pour les erreurs par omission et de 14,61 % pour celles par commission. S'agissant de données d'observation de la Terre à ~30 m de résolution, ces taux sont tout à fait acceptables selon Congalton (1991). D'autant plus que la valeur du coefficient de Kappa (Cohen, 1960) se situe dans l'intervalle]0,6 ; 0,8], ce qui démontre un très bon accord entre les données issues des observations de terrain et celles des résultats cartographiques (Landis & Koch, 1977).

TABLEAU III

Matrice de confusion (en nombre d'observations) issue de la comparaison des résultats cartographiques de localisation et de délimitation des forêts humides avec les données terrain

	Résultats cartographiques		Coefficient de Kappa = 0.797
Habitats rencontrés sur le terrain	Autres habitats (hors forêts humides)	**Forêts humides**	
Urbain	86	0	
Agriculture	187	6	
Forêts sèches	459	37	
Maquis	144	17	
Milieux à végétation clairsemée	22	0	
Plages et dunes de sable	6	0	
Tourbières	5	0	
Cours d'eau	27	2	
Lacs naturels	27	0	
Lagunes	32	0	
Mer	1	0	
Prairies humides	73	0	
Forêts humides	**71**	**374**	
Marais	120	2	
Barrages et réservoirs	58	0	

Selon le tableau III, les forêts humides sont confondues principalement avec les forêts sèches (8,45 %) et les maquis (3,88 %) et, à moindre mesure, avec les milieux agricoles (1,37 %) et les marais (0,46 %).

Ces résultats confirment que l'approche développée pourrait être un bon outil pour la localisation et la délimitation des forêts humides à grande échelle. Elle pourrait, par exemple, faciliter les inventaires terrain, en définissant les zones à prospecter et à suivre en priorité. Ou encore, mieux définir les fonctions de ces milieux (hydrologiques, biogéochimiques et biologiques), en lien avec les services écosystémiques qu'elles pourraient potentiellement rendre aux populations riveraines (épuration de l'eau, régulation des crues, approvisionnement en bois, protection contre l'érosion des sols, etc.).

CONCLUSION

Les outils de télédétection satellitale permettent de couvrir régulièrement des zones géographiques importantes et souvent très difficiles d'accès. De ce fait, leurs apports représentent un grand avantage pour la caractérisation et l'inventaire du patrimoine naturel à différentes échelles spatiales et temporelles, avec des approches standardisées et facilement reproductibles. De plus, l'utilisation des approches multi-spectrales et multi-dates améliore grandement la cartographie de certains habitats, tels que les milieux humides. Ces approches, couplées à des données géomorphologiques et hydrologiques, permettraient aussi la cartographie de certains habitats très spécifiques, telles les forêts humides.

Lors de cette étude, ces outils, couplés avec des données terrain, ont été utilisés pour cartographier les forêts humides dans la région d'El Kala. Ceci a permis de localiser ces écosystèmes, de les distinguer

des autres types d'habitats et de les délimiter sur l'ensemble de la zone d'étude. Les résultats de la validation ont démontré la fiabilité de l'approche, avec une précision d'utilisateur supérieure à 85 %.

Ces premiers résultats semblent être très prometteurs, dans la mesure où ils apportent une nouvelle information fiable sur la localisation et la délimitation de la surface couverte par les forêts humides dans la région d'El Kala. Cependant, des perfectionnements sont encore possibles, notamment avec l'intégration d'autres variables essentielles pour l'étude de la distribution spatiale de ces milieux, telles les données climatiques (précipitations, températures et évapotranspiration) et pédologiques (capacité des différents types de sol à retenir l'eau en surface) ou encore les étendues et les profondeurs des nappes phréatiques, en connexion avec ces milieux. En outre, l'utilisation des nouvelles données d'observation de la Terre, fournies par les satellites optiques Sentinel 2A et 2B (dans le cadre du programme européen Copernicus pour l'observation de la Terre), pourrait aussi largement contribuer à améliorer ces résultats cartographiques. En effet, avec des images à très haute résolution spatiale (pouvant aller jusqu'à 20 m et 10 m pour les bandes dans le visible et les gammes PIR et MIR), spectrale (13 bandes disponibles) et temporelle (temps de retour estimé à ~5 j), elles permettraient de mieux cerner la phénologie des groupements végétaux.

Enfin, la méthodologie développée ici se base sur une approche standard, pouvant être facilement adaptable à d'autres contextes éco-géographiques. Ce qui offre de très bonnes perspectives pour des mises en œuvre sur des échelles spatiales plus larges (ex. les grands bassins versants, voir même à une échelle nationale) et qui pourraient être aussi couplées à des analyses diachroniques, afin de mieux suivre les dynamiques et les changements des superficies en forêts humides au fil du temps.

RÉFÉRENCES

ATLAS IV (2004).— *Atlas des zones humides algériennes d'importance internationale*. Disponible à la Direction Générale des Forêts, Atlas 105.

BEGNI, G., ESCADAFAL, R., FONTANNAZ, D. & HONG-NGA NGUYEN, A.T. (2005).— La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. *Les dossiers thématiques du CSFD*, N° 2: 1-44.

BELHADJ, G. (2008).— *Contribution à l'étude des exigences écologiques des* Ardeidae *et de l'Ibis falcinelle* Plegadis falcinellus*, dans le complexe de zones humides d'El-Kala (Algérie).* Thèse Doctorat (Sciences agronomiques), I.N.A, El-Harrach, Alger.

BELOUAHEM-ABED, D., BELOUAHEM, F. & DE BÉLAIR G. (2009).— Biodiversité floristique, vulnérabilité et conservation des aulnaies glutineuses de la Numidie algérienne (NE algérien). *Eur. J. Scient. Res*., 32: 329-361.

BENSETTITI, F. (1992).— *Approche phytosociologique des aulnaies de la région d'El-Kala (Algérie). Doc. Phytosoc*., N.S., 14: 231-240.

BENSETTITI, F. (1995).— *Contribution à l'étude phytosociologique des ripisylves du nord de l'Algérie. Essai de synthèse à l'échelle de la Méditerranée occidentale.* Thèse Doctorat en Sciences, Université Paris-Sud, Centre d'Orsay. BENSETTITI, F. & LACOSTE, A. (1999).— Les ripisylves du nord de l'Algérie: essai de synthèse systématique à l'échelle de la Méditerranée occidentale. *Ecol. Mediterr.*, 25: 13-39.

BENSLAMA, M. & ZANACHE, H. (2006).— Étude palynologique des marais tourbeux du complexe humide d'El Kala : cas de Bourdim (Alt : 12 m) et de Garaet El Ouez (Alt : 45 m). *Revue des sciences et de la technologie. Synthèse N°15 Juin-Décembre 2006. Publication de l'Université Badji Mokhtar – Annaba* : 515-20.

BERTRAND, N. (2007).— *Importance et caractéristiques des milieux forestiers riverains et humides au Québec*. Québec, gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'environnement et de la protection des forêts.

BNEDER (2008).— *Rapport sur la caractérisation des formations forestières dans la wilaya d'El Tarf, Algérie*. Inventaire forestier national.

BOUKHROUFA, M. (2017).— *Écophysiologie du Hérisson d'Algérie* Atelerix algirus *(Lerboullet, 1842) dans le Parc National d'El Kala*. Thèse doctorat es. Sciences, Univ. Annaba.

BOURNERIAS, M., ARNAL, G. & BOCK, C. (2001).— *Guide des groupements végétaux de la région parisienne. Bassin parisien - Nord de la France (Écologie et phytogéographie)*. Nouvelle édition illustrée et entièrement mise à jour.

BRADLEY, D., THAYER, S., STENTZ, A. & RANDER, P. (2004).— *Vegetation detection for mobile robot navigation.* (Technical Report CMU-RITR-04-12). Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.

CLERICI, N., WEISSTEINER, C.J., PARACCHINI, M.L., BOSCHETTI, B., BARALDI, A. & STROBLA, P. (2013).— Pan-European distribution modeling of stream riparian zones based on multi-source Earth Observation data. *Ecol. Indicators,* 24: 211-223.

COHEN, J. (1960).— A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ. & Psychol. Measur*., 20: 37-40.

CONGALTON, R. (1991).— A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Rem. Sens. Envir*., 37: 35-46.

COUILLARD, L. & GRONDIN, P. (1986).— *La végétation des milieux humides du Québec*. Les publications du Québec, Québec.

CSE (1996).— *Utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution*. Centre de Suivi Écologique pour la Gestion des Ressources Naturelles.

DAVRANCHE, A. (2008).— *Suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection en référence à leur intérêt avifaunistique*. Géographie. Université de Provence - Aix-Marseille I.

DAVRANCHE, A., POULIN, B., LEFEBVRE, G. (2013).— Mapping flooding regimes in Camargue wetlands using seasonal multispectral data. *Rem. Sens. Envir*., 138: 165-171.

DE BÉLAIR, G. (1990).— *Structure, fonctionnement et perspective de gestion de quatre éco-complexe lacustres et marécageux (El Kala, Algérie extrême orientale)*. Thèse Doctorat Université USTL Montpellier II.

DE BÉLAIR, G. (1995).— *Habitats dulçaquicoles en Numidie algérienne*. Communication présentée au colloque scientifique Biomes 97 (7ème rencontre de l'ARPE, Dignes-les-Bains).

DÉCAMPS, H. & DÉCAMPS, O. (2002).— *Ripisylves méditerranéennes*. Numéro 12. Tour du Valat, Arles (France).

DUFOUR, S. & PIEGAY, H. (2006).— Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. *Rev. For. Fr.,* LVIII.

FINLAYSON, C.M., HOLLIS, T. & DAVIS, T. (1992).— *Proceedings of the Symposium on "Managing Mediterranean wetlands and their birds"*. Grado, Italy, 6-9 February 1991. IWRB Special Publication n° 20.

GAO, B.G. (1996).— NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Rem. Sens. Envir*., 58: 257-266.

GASTAL, V. (2016).— *Méthodologie appliquée de cartographie des dynamiques d'inondation des zones humides méditerranéennes*. M.Sc. thesis, University of Orleans / Tour du Valat.

HUETE, A.R. (1988).— A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Rem. Sens. Envir*., 25: 295-309.

JENSEN, J.R. (2007).— *Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective (2nd ed.).* Prentice Hall, Inc.: Upper Saddle River, NJ.

KERR, J.T. & OSTROVSKY, M. (2003).— From space to species: ecological applications for remote sensing. *TREE*, 18: 299 305.

LANDIS, J.R. & KOCH, G.G. (1977).— The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159 174.

LEBŒUF, A., SAMSON, M.P. & PAQUET, A. (2015).— *Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellite Landsat*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des Forêts.

LEHNER, B. & GRILL, G. (2013).— Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrol. Process*., 27: 2171-2186.

LUCAS, R.M., BLONDA, P., BUNTING, P., JONES, G., INGLADA, J., ARIAS, M., KOSMIDOU, V., MANAKOS, I., ADAMO, M., CHARMOCK, R., TARANTINO, C., MüCHER, C.A., JONGMAN, R.H.G., KRAMER, H., ARVOR, D., HONRADO, P. & MAIROTA, P. (2015).— The Earth observation data for habitat monitoring (EODHaM) system. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*., 37: 1-6.

MASSENET, J.Y. (2014).— *Les forêts riveraines et leurs milieux associés en France : fonctions, habitats, fonctionnement*. http://jymassenet-foret.fr

MEDITERRANEAN WETLANDS OBSERVATORY (2012).— *First Mediterranean Wetlands Observatory report - Technical report - 2012.* Tour du Valat, France.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005).— *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC, (2002).— *Riparian areas. Functions and strategies for Management*. Committee on Riparian Zone Functioning and Strategies for Management, Water Science and Technology Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC.

PÉRENNOU, C., BELTRAME, C., GUELMAMI, A., TOMAS VIVES, P. & CAESSTEKER, P. (2012).— Existing areas and past changes of wetland extent in the Mediterranean region: an overview. *Ecol. Mediterr*., 38: 53-66.

PÉRENNOU, C., GUELMAMI, A., PAGANINI, M., PHILIPSON, P., POULIN, B., STRAUCH, A., TOTTRUP, C., TRUCKENBRODTK, J. & GEIJZENDORFFER, I.R. (2018).— Mapping Mediterranean wetlands with remote sensing: A good-looking map is not always a good map. *Advanc. Ecol. Res*., 58: 243-277.

PICHARD, G. (2004).— *Les forêts humides (ripisylves et forêts marécageuses) : des milieux patrimoniaux justifiant une sylviculture raisonnée*. CRPF de Bretagne.

PLAN BLEU (2009).— *State of the Environment and Development in the Mediterranean*. Athens, UNEP-MAP Plan Bleu.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H. & SOROOSHIAN, S. (1994).— A modified soil adjusted vegetation index. *Rem. Sens. Envir*., 48: 119-126.

QI, J., KERR, Y.H. & CHEHBOUNI A. (1994).— External factor consideration in vegetation index development. *Proc. Phys. Measur. Signat. Rem. Sens*., ISPRS: 723-730.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2015).— *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W.445 (1973).— Monitoring vegetation systems in the Great

Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP*-351, I: 309-317.

SAMRAOUI, B., BENYACOUB, S., MECIBAH, S. & DUMONT, H.J. (1993).— Afrotropical libellulids (*Insecta: Odonata*) in the Lake district of El Kala, North-East Algeria with a rediscovering of *Urothemis edwardsi* (Selys) and *Acisoma panorpoides ascalaphoides* (Rambur). *Odonatologia*, 22: 365-372.

SAMRAOUI, B. & DE BÉLAIR, G. (1994).— Death of a lake: Lac noir in Northeastern Algeria. *Envir. Conserv*.. 21: 169-172.

SAMRAOUI, B., DE BÉLAIR, G. & BENYACOUB, S. (1992).— A much-threatened lake: Lac des Oiseaux in Northeastern Algeria. *Envir. Conserv*., 19: 264-267.

SECRÉTARIAT DE LA CONVENTION DE RAMSAR (2016).— *Introduction à la convention sur les zones humides (anciennement Le Manuel de la Convention de Ramsar)*. Secrétariat de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse. TURNER, W., SPECTOR, S., GARDINER, N., FLADELAND, M., STERLING, E. & STEININGER, M. (2003).— Remote sensing for biodiversity science and conservation. *TREE*, 18: 306-314.

VÉLA, E. & BENHOUHOU, S. (2007).— Évaluation d'un nouveau point chaud de biodiversité végétale dans le Bassin méditerranéen (Afrique du Nord). *C.R. Biologies*, 330: 589-605.

XU, H. (2006).— Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Rem. Sens*., 27: 3025-3033.