Sebkhat Séjoumi et son Bassin Versant (Tunisie) :

Un Territoire en Mouvement

Analyse des dynamiques spatiotemporelles des superficies en eau libre et de l'occupation du sol entre 1987 et 2018



Anis GUELMAMI
Avril 2020

Contact : guelmami@tourduvalat.org

Tour du Valat
Institut de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes

Sommaire

1. Contexte et objectif de l'étude 2

1.1. Objectif de l'étude 3

1.2. Site d'étude 3

2. Approches méthodologiques 5

2.1. Données utilisées 5

2.2. Cartographie et suivi des dynamiques des eaux de surface 5

2.3. Cartographie et suivi des dynamiques d'occupation du sol 7

3. Résultats du suivi des superficies en eau libre 9

3.1. Dynamiques intra-annuelles 9

3.2. Dynamiques interannuelles 13

3.2.1. Variations annuelles 14

3.2.2. Variations saisonnières 15

3.3. Causes probables des tendances observées 16

3.4. Conclusions sur les dynamiques des superficies en eau libre 20

4. Résultats du suivi de l'occupation du sol 23

4.1. Tendances générales 26

4.2. Dynamiques des conversions 27

4.3. Expansion urbaine et des terrains bâtis : le vrai moteur des changements 28

4.4. Impacts de l'expansion urbaine et des terrains bâtis 33

4.4.1. Imperméabilisation des sols et risques liés aux crues et aux inondations 33

4.4.2. Consolidation des berges et impacts sur l'écosystème de la sebkha 37

4.5. Conclusions sur les dynamiques d'occupation du sol 40

5. Conclusion générale et recommandations 44

Bibliographie 46

Annexe 1 : Dates d'acquisition des images satellites utilisées 48

Annexe 2 : Nomenclature hybride CORINE Land Cover / Ramsar 49

Annexe 3 : Matrices de validation des résultats LULC 2010 et 2018 51

Annexe 4 : Caractérisation des enjeux socio-économiques face aux risques de crue et d'inondation . 53

1. Contexte et objectif de l'étude

La présente étude fait suite à une demande de Petite Subvention accordée par le CEPF (*Critical Ecosystem Partnership Fund*), dans le cadre du projet portant sur « L'engagement des parties prenantes nationales et internationales pour la conservation de Sebkhat Séjoumi et ses populations d'oiseaux », porté par l'Association les Amis des Oiseaux (AAO/BirdLife en Tunisie) et également financé par le CEPF. Elle vise à garantir une meilleure prise de conscience de l'importance des écosystèmes humides de cette sebkha pour la biodiversité et les populations riveraines. Ceci en passant par une amélioration des connaissances sur ce site, notamment sur les habitats naturels qu'il abrite, leurs fonctions, les tendances observées au cours de ces dernières décennies ainsi que les services potentiellement rendus à la société.

Sebkhat Séjoumi est une zone humide d'une grande valeur écologique en plein milieu urbain (banlieue sud-ouest du Grand Tunis). Son importance, notamment pour les oiseaux d'eau migrateurs, a été reconnue par l'attribution de plusieurs statuts internationaux : Zone Humide d'Importance Internationale (Convention Ramsar), Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux et de la Nature (ZICO) et Zone Clés pour la Biodiversité (ZCB). C'est également le 4ème site en termes d'importance pour l'hivernage des oiseaux d'eau en Afrique du Nord (Sayoud et *al*., 2017). Cette zone humide, dont la plupart des fonctions naturelles sont encore préservées à ce jour malgré les nombreuses dégradations qu'elle a subies, offre également de multiples services écosystémiques aux populations riveraines (parfois même sans qu'ils s'en aperçoivent), tels que la protection contre les crues, le pâturage, la collecte de fourrage, l'atténuation de certains effets liés au changement climatique, ou encore des services récréatifs.

Elle est l'une des dernières « grandes » zones humides dans un état supposé encore intact et « naturel » de la région du Grand Tunis (Ayache et *al*., 2006). Malheureusement, depuis quelques années elle suscite de nombreuses convoitises, notamment de la part de la promotion immobilière, suite à la volonté affichée des autorités de lancer un grand projet d'aménagement et de développement dans ce secteur et ses alentours. Ce dernier, dans sa forme actuelle, vise à transformer complètement la zone humide (remblaiement, assèchement d'une partie des zones en eau, endiguement des berges…etc.) afin de « l'assainir » et d'en faire un lieu de villégiature, de développement touristique et de quartiers résidentiels (à l'image du Lac de Tunis et de ses berges, quelques décennies auparavant). Cependant, il faut noter que l'Etude d'Impacts sur

l'Environnement (EIE) de ce projet, menée entre 2016 et 2017, n'a pas encore reçu d'avis favorable de la part de certaines institutions nationales, notamment de l'Agence National de Protection de l'Environnement (ANPE), seule autorité compétente pour valider les EIE en Tunisie. En effet, cette dernière, ainsi que le projet en question, ne tiendraient pas assez compte de la richesse biologique exceptionnelle du site, des caractéristiques écologiques naturelles lui proférant ce statut, ainsi que des liens étroits qui existent entre son fonctionnement hydrologique et son rôle important pour le maintien de cette biodiversité et des nombreux services écosystémiques qu'il fournit aux populations riveraines. Il est donc plus qu'urgent d'engager des actions visant à mieux valoriser Sebkhat Séjoumi, tout en lui garantissant un état et un fonctionnement les plus naturels possible. Celles-ci ne se concrétiseront que grâce à une plus grande prise de conscience, de la part de la population mais également des autorités publiques et du secteur privé, de son importance pour l'Homme et la biodiversité.

1.1. Objectif de l'étude

Le présent travail vise à contribuer au renforcement et à la consolidation des connaissances relatives aux écosystèmes humides de Sebkhat Séjoumi, à travers des approches scientifiques basées sur des outils opérationnels ayant été testés et validés par ailleurs (MWO, 2012, 2018). Cette contribution se fera à travers l'étude de l'évolution de l'occupation des sols, des habitats humides ainsi que des dynamiques spatio-temporelles des eaux de surface durant les 30 dernières années, à l'aide des outils issus des technologies d'Observation de la Terre (télédétection). L'ensemble des résultats cartographiques produits serviront à développer une série d'indicateurs spatiaux sur l'état et les tendances de la sebkha et de ses habitats, qui pourront par la suite être croisés avec d'autres données et informations sur la biodiversité (ex. les oiseaux d'eau), les modes de gestion (ex. l'eau et les aménagements hydrauliques) ou encore la socio-économie (ex. la démographie).

1.2. Site d'étude

Sebkhat Séjoumi (qui prend son nom du village de Séjoumi aux abords du lac) est la plus continentale des trois grandes zones humides se situant aux abords du Grand Tunis et la seule qui n'ait pas d'exutoire naturel vers la mer (Figure 1). C'est aujourd'hui un bassin fermé, très peu profond, qui reçoit les eaux de plusieurs petits oueds, et notamment celles de l'oued

Gueriana à son extrémité nord-ouest et de l'oued El Melah qui vient de l'ouest. Elle reçoit également les eaux résiduelles de nombreux quartiers de la banlieue non encore rattachés aux réseaux d'assainissement. La qualité de l'eau et des vases sur les marges du plan d'eau naturel est donc souvent douteuse. Etant donné que c'est une des sebkhas les plus septentrionales de la Tunisie, elle contient toujours au moins un peu d'eau en hiver, contrairement à d'autres plus au sud, pouvant rester à sec pendant plus d'une année, faute de précipitations (RSIS, 2016).

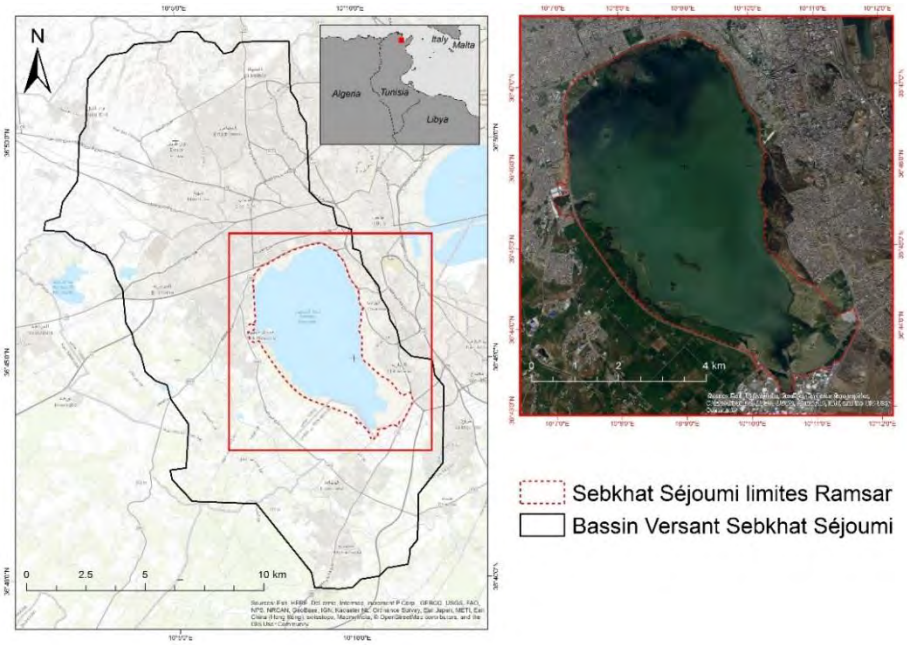


Figure 1 : Localisation du site d'étude (Sebkhat Séjoumi et son bassin versant).

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de travailler à l'échelle du plus proche bassin versant (BV) entourant la sebkha. Ceci afin de mieux caractériser les changements et les dynamiques qui seraient les plus susceptibles d'impacter le fonctionnement écologique et hydrologique de la sebkha, la biodiversité qu'elle renferme, ou encore les services écosystémiques qu'elle fournit. Ce dernier a donc été défini à l'aide des données globales HydroSHEDS (Lehner, 2014), où le niveau 8 a été retenu comme référence pour la délimitation de la zone à cartographier. Il couvre une superficie d'environ 22 000ha (dont 2 900ha occupés par le site Ramsar de Sebkhat Séjoumi) et appartient à l'espace périurbain tunisois. Il possède une forme allongée et reçoit les eaux qui prennent source sur les versants des djebels Nahli et Ammar au nord, des djebels Aïn Krima et Sidi Salah à l'ouest, des djebels Nadhour et Ettalla au sud, des collines de Bir El Kassâa, El Ouerdia et Rass Tabia à l'est. Les rives de la sebkha se caractérisent par une topographie particulièrement plane à l'ouest et au nord, où la pente ne dépasse pas 4 %, tandis qu'elle atteint 10 % au sud et à l'est (Chouari, 2013).

2. Approches méthodologiques

Les approches méthodologiques et les données utilisées dans le cadre de ce travail sont, pour l'essentiel, issues des techniques d'Observation de la Terre (OT). Elles permettent d'étudier, grâce à l'intégration de séries temporelles denses, certaines conditions biotiques et abiotiques observées à la surface de la Terre, en particulier le sol, la topographie, l'hydrologie, le couvert végétal et l'utilisation des terres (Jensen, 2007). Ici, les approches développées permettront de suivre les dynamiques spatiotemporelles intra- et interannuelles des superficies en eau libre (*Surface Water Dynamics* ou SWD) et de l'occupation du sol (*Land Use/Land Cover* ou LULC).

2.1. Données utilisées

La liste de l'ensemble des images satellites utilisées (répertoriées selon leurs dates d'acquisition) est dans l'Annexe 1. Elles couvrent toutes la période allant de janvier 1987 à décembre 2018 (31 ans) avec une fréquence quasi mensuelle grâce aux 387 images acquises. Elles sont issues des collections Landsat-4 et Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM, Landsat-8 OLI/TIRS (les quatre à 30 m de résolution spatiale), acquises via le portail web EarthExplorer de l'USGS (*United States Geological Survey*), ainsi que des satellites Sentinel-2A et -2B pour l'année 2018 (à 20 m de résolution spatiale), via le portail web PEPS du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Les deux plateformes permettent d'obtenir des données satellitales prétraitées, avec la transformation des valeurs spectrales en réflectance de surface. Ce qui offre la possibilité de les exploiter sans avoir à opérer de corrections atmosphériques préalables.

En plus des images satellites, d'autres données d'OT ont été mobilisées, notamment le Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM 1 arc-s Global DEM (*Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc-second*) à 25m de résolution spatiale. Il permettra ici de cartographier et de délimiter les zones présentant de forts risques d'inondation en cas de crue du BV.

2.2. Cartographie et suivi des dynamiques des eaux de surface

Les eaux de surface (ou eaux libres) ont été délimitées sur chaque image 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 (MIR) au lieu du Proche-Infrarouge (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) :

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

Ainsi, il sera possible de combiner l'ensemble des résultats calculés avec la formule précédente et de cartographier les dynamiques spatiotemporelles de l'inondation [1] de surface pour l'hydropériode 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 chaque hydropériode (Figure 2) et de définir, ainsi, l'étendue maximum de la superficie en eau libre durant cette dernière.

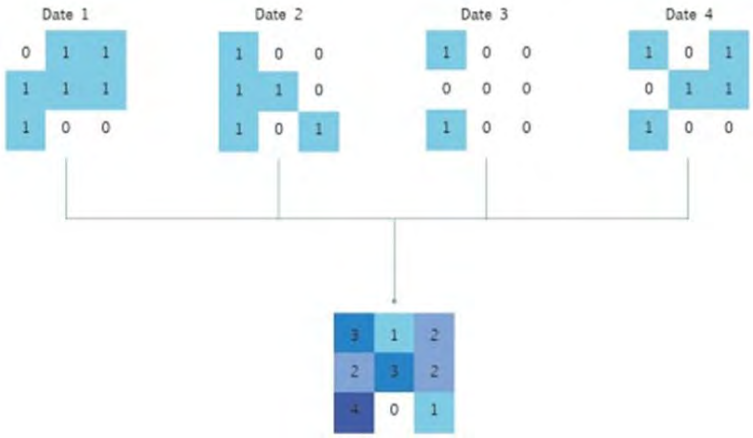


Figure 2 : Addition pixel à pixel des résultats du MNDWI et détermination des dynamiques spatiotemporelles des superficies en eau libre. Les degrés de submersion varient de 0 (jamais inondé) à N (inondé en permanence) où N correspond au nombre d'images utilisées.

Cependant, il faut noter que le MNDWI ne permet de distinguer que les pixels en eau dans les milieux ouverts. Autrement dit, ceux étant caractérisés par un couvert végétal dense ne sont pas bien repérées et certaines zones en eau, lorsqu'elles sont couvertes par cette végétation, pourraient apparaître comme étant exondées (Perennou et *al*., 2018). Néanmoins, l'approche multi-date permettrait d'atténuer légèrement cet effet, du moins pour la végétation aquatique

[1] Le terme « inondation » est utilisé ici pour désigner la présence d'eau à la surface. A ne pas confondre donc avec le même terme lorsqu'il est utilisé en référence au risque de crue.

émergente se trouvant totalement ou partiellement sous l'eau une partie de l'année (Gastal, 2016).

Sur la base de l'approche méthodologique décrite ci-dessus, le suivi des dynamiques spatiotemporelles des eaux de surface sera effectué sur deux échelles de temps : une première analyse intra-annuelle pour les 4 hydropériodes 1987, 2000, 2010 et 2018 sur l'ensemble du BV de Sebkhat Séjoumi. Puis une seconde analyse séquentielle (image par image), appliquée seulement au niveau de la sebkha (limites Ramsar), afin de mieux caractériser les tendances interannuelles observées lors des trois décennies couvertes (1987-2018).

2.3. Cartographie et suivi des dynamiques d'occupation du sol

Afin d'analyser l'évolution et les tendances de l'occupation et de l'utilisation des sols (LULC) à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi durant les 3 dernières décennies, 4 cartes thématiques ont été produites pour les hydropériodes annuelles 1987, 2000, 2010 et 2018. L'approche cartographique utilisée se base sur une classification supervisée et orientée objet des images satellites (à l'aide du logiciel de traitement d'image GEOclassifier v2.4.1). C'est une méthode assez simple à mettre en œuvre (MWO, 2014) et nécessitant essentiellement quatre étapes (Figure 3) :

a) **Segmentation des images :** Pour chaque hydropériode annuelle, un processus de segmentation est appliqué, afin de délimiter chaque objet thématique (ex. une terre cultivée, un lac, une route, une surface bâtie...etc.) en fonction des trois variables spatiale, spectrale et temporelle ;
b) **Classification des images :** Les polygones de segmentation sont ensuite utilisés pour classer les images en entrée (sur la base de parcelles d'apprentissage "connues" et en appliquant l'algorithme de classification supervisée Maximum de Vraisemblance). Pour chaque hydropériode, le résultat est une carte thématique dont les classes LULC sont définies en fonction de la nomenclature hybride CORINE Land Cover / Ramsar (voir Annexe 2) ;
c) **Corrections post-classification :** L'avant dernière étape correspond aux corrections manuelles, sur la base des connaissances et/ou expérience propres à l'opérateur, mais

également des données auxiliaires existantes (y compris les relevés terrain). L'objectif est de réduire autant que possible les erreurs de confusion identifiées ;

d) **Validation des résultats :** Enfin, des validations des cartes LULC les plus récentes (2018 et 2010) ont été réalisées à l'aide de l'outil en ligne LACO-Wiki (The Land Cover Validation Platform). Les résultats sont présentés dans l'Annexe 3.

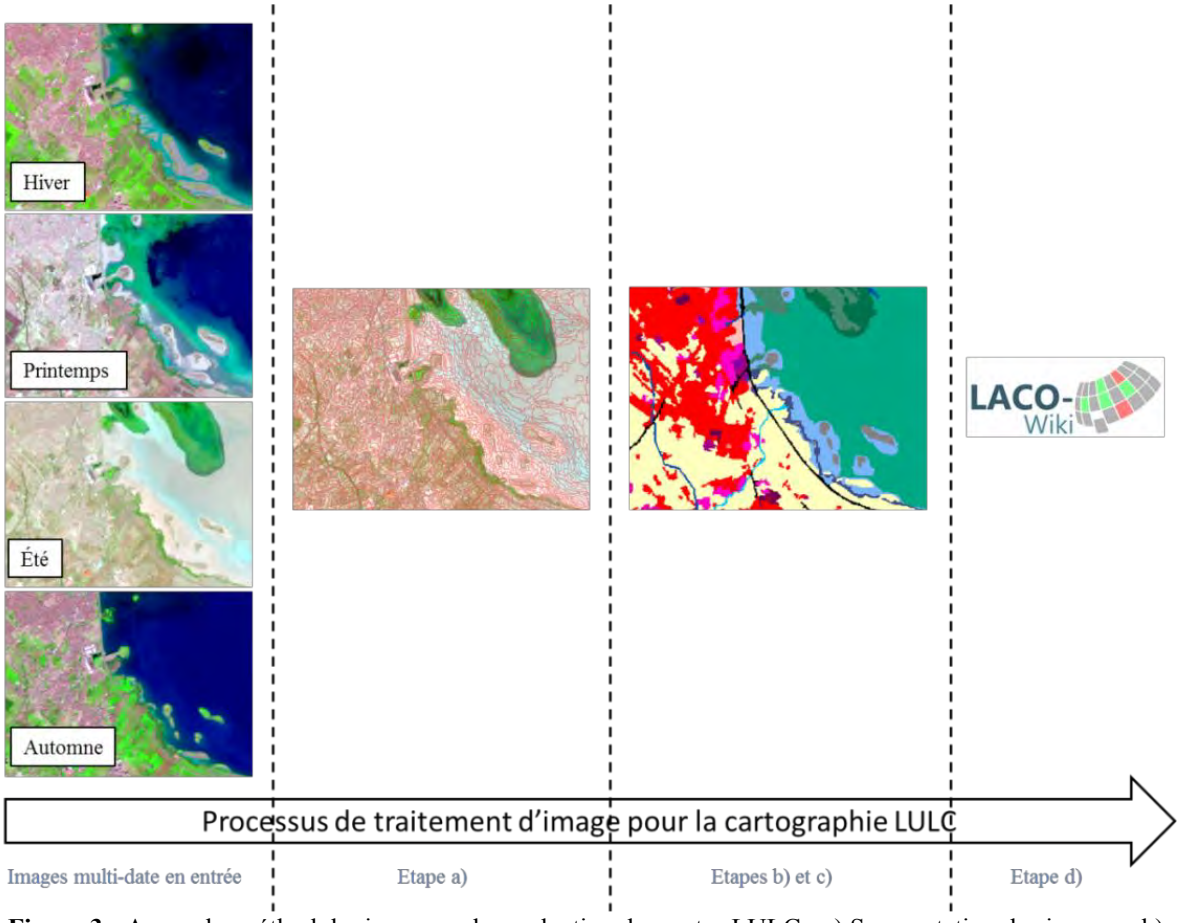


Figure 3 : Approche méthodologique pour la production des cartes LULC : a) Segmentation des images ; b) Classification de l'occupation du sol ; c) Corrections post-classification et d) Validation.

3. Résultats du suivi des superficies en eau libre

3.1. Dynamiques intra-annuelles

Grâce aux traitements des images satellites, il a été possible de caractériser les dynamiques intra-annuelles des superficies en eau libre à l'échelle de l'ensemble du BV de Sebkhat Séjoumi pour les hydropériodes annuelles 1987, 2000, 2010 et 2018 (Figure 4).

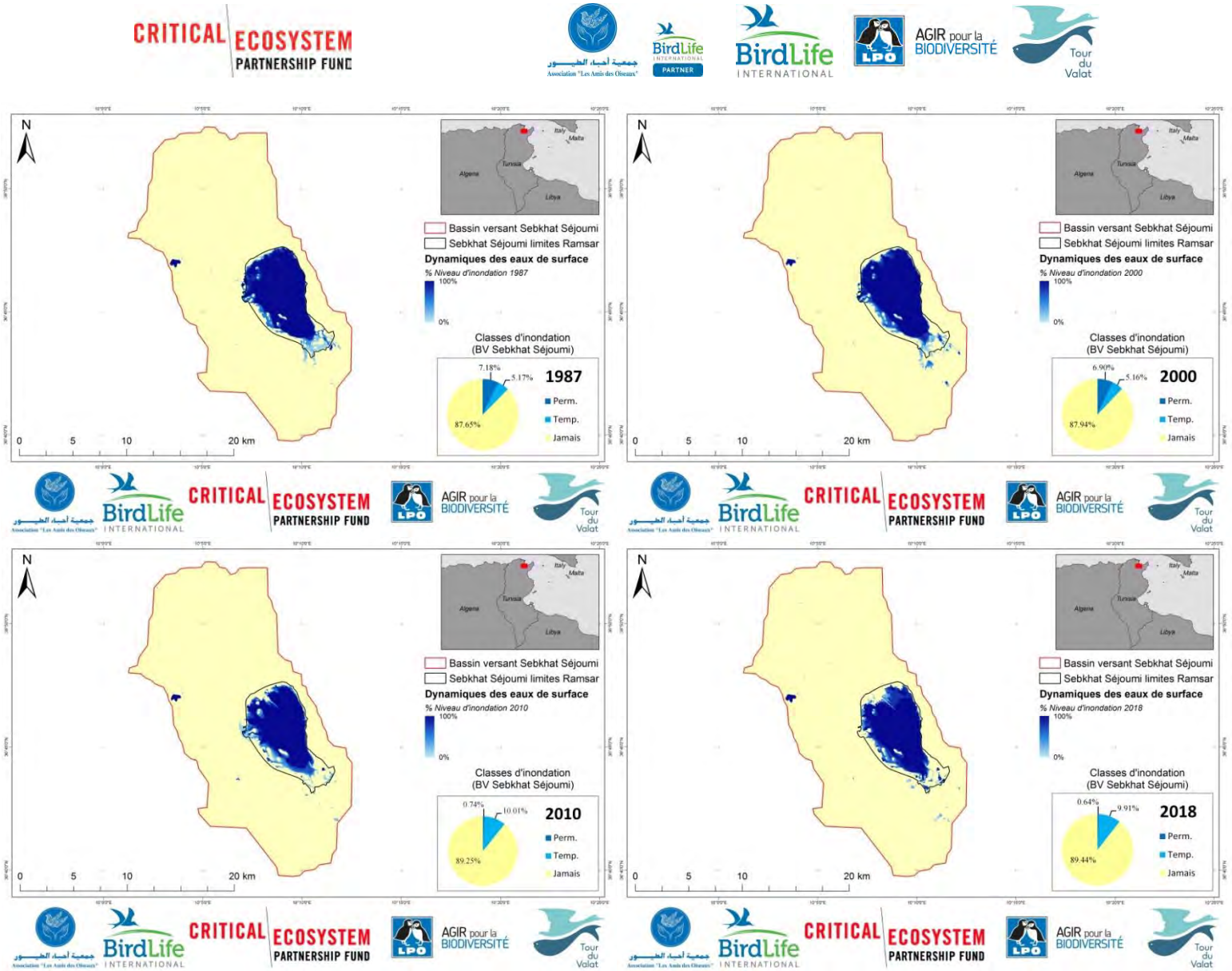


Figure 4 : Cartes des régimes des eaux de surface à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi pour les hydropériodes annuelles 1987, 2000, 2010 et 2018.

Contrairement à ce qui est communément admis, notamment dans l'Etude de Mise en Valeur et d'Aménagement de Sebkhat Séjoumi (MEHAT, 2017), les superficies en eau libre de la zone humide ne semblent pas augmenter ces 30 dernières années, y compris au sein de la zone humide naturelle. Selon la Figure 5, si on prend comme référence l'hydropériode annuelle 1987, à l'intérieur des limites du site Ramsar, l'aire totale submergée (temporairement ou en permanence) a reculé de 2 572 ha à 2 238 ha en 2018 (soit une perte de 13 %). Ceci est particulièrement vrai pour les zones ayant été en eau en permanence. En effet, ces dernières occupaient plus de 50 % du site jusqu'en 2000 (52.40 % en 1987 et 50.73 % en 2000), puis en 2010 ce taux passe à 5.03 %, pour finalement atteindre 4.13 % en 2018.

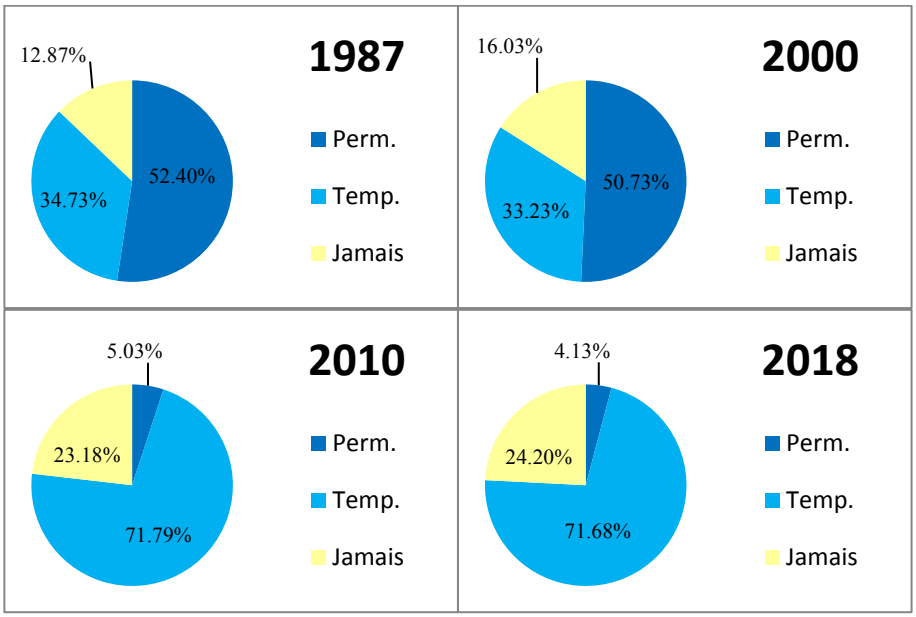


Figure 5 : Evolution des superficies en eau libre au sein des limites du site Ramsar de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018, représentée selon 3 classes de submersion : en permanence (Pemr.) ; temporairement (Temp.) et jamais submergée (Jamais).

Selon ces analyses et les cartes qui en résultent (Figures 6), deux phénomènes marquants sont observés : i) le changement de régime d'une grande partie de la sebkha passant d'une mise en eau permanente vers une submersion de plus en plus temporaire (cette dernière classe est passée de 1 025 ha en 1987 à plus de 2 116 ha en 2018) et ; ii) l'assèchement progressif de certains secteurs, notamment au niveau des berges nord, est et, à moindre mesure, sud de la sebkha où la présence d'eau libre à quasiment disparue en l'espace des 30 années de suivi.

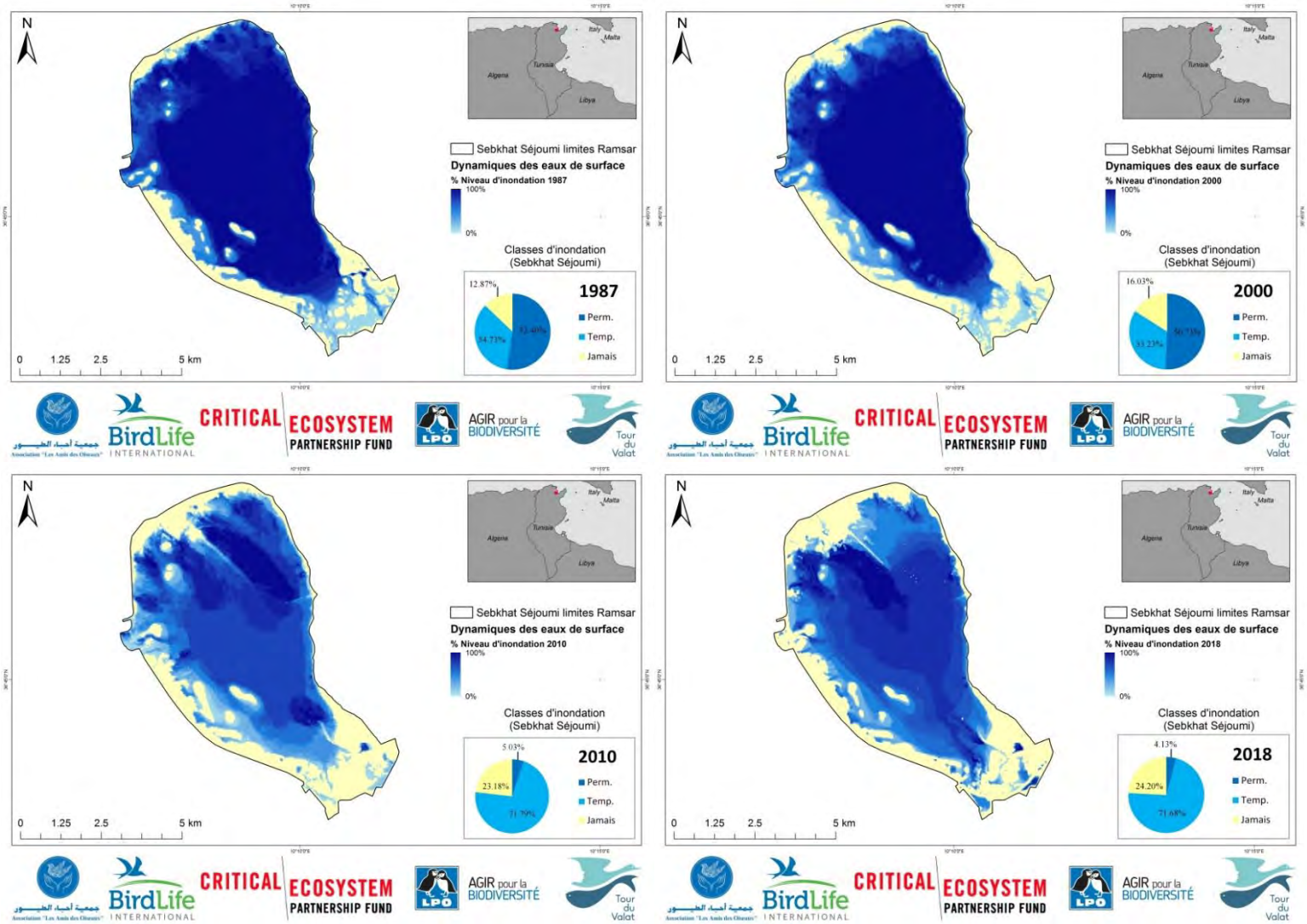


Figure 6 : Cartes des régimes des eaux de surface au sein des limites Ramsar de Sebkhat Séjoumi pour les hydropériodes annuelles 1987, 2000, 2010 et 2018.

3.2. Dynamiques interannuelles

En plus des dynamiques intra-annuelles (voir 4.1), l'analyse séquentielle (image par image) a permis de dégager les grandes tendances observées dans les superficies des eaux libres au cours des trois dernières décennies. Le principal résultat de cette analyse est illustré dans la Figure 7, avec le calcul de la superficie en eau libre pour chacune des 387 images traitées à l'échelle de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar).

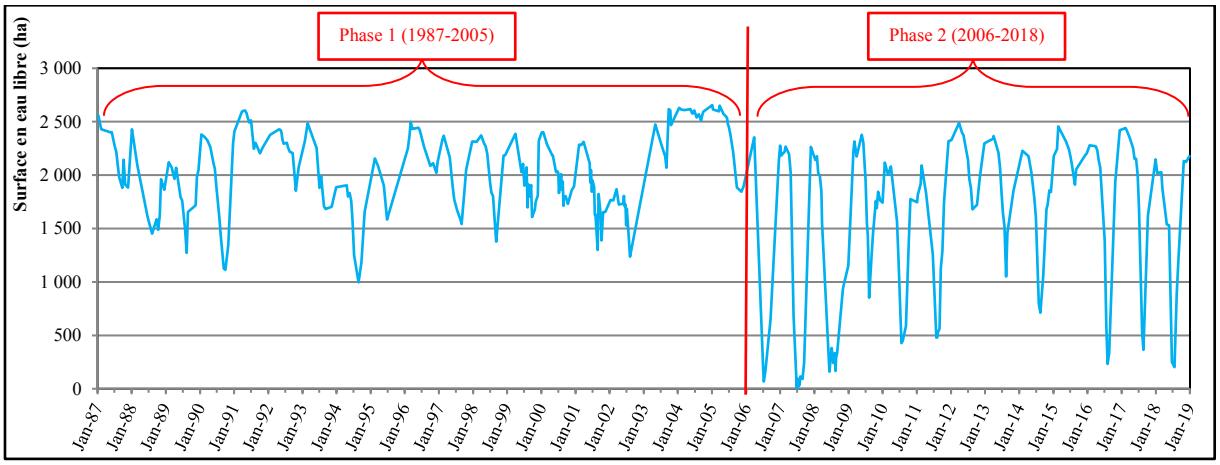


Figure 7 : Evolution des superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar) entre 1987 et 2018, avec la distinction des 2 différentes phases observées : avant et après 2006.

D'une manière générale, les tendances observées ressemblent assez à ce qui est attendu pour ce type de zone humide méditerranéenne (lac et étendues d'eau naturels salés temporaires/intermittents), à savoir : un maximum de submersion en période humide (fin de l'automne, saison hivernale et début du printemps) et un assèchement progressif à partir de la fin du printemps et durant les mois estivaux.

Cependant, selon ce même graphique en Figure 7, on distingue très clairement deux grandes phases dans la série temporelle : avant et après 2006. Durant la 1ère phase (1987-2005), on observe des fluctuations saisonnières, mais leurs amplitudes dépassent rarement les 1 000ha (en sachant que le site fait ~2 952 ha et que le maximum de submersion observé est de ~2 650 ha, soit environ 90% de la surface totale du site). A partir de 2006, elles dépassent très régulièrement les 1 500 ha (voir 1 800 ha) entre les valeurs min et max et c'est également durant cette année 2006 qu'on enregistre le premier assèchement quasi-total de la sebkha en saison estivale (en juillet 2006 avec à peine 66 ha d'eau libre, soit ~2.25 % de la surface du site). Ce

phénomène (assèchement quasi-total), semble alors s'installer durablement et revenir les années suivantes de manière récurrente (avec même le minimum jamais enregistré pour l'ensemble de la série temporelle observé en juin 2007, où l'eau libre couvrait à peine plus de 3 ha). De plus, à partir de 2006, on tombe souvent sous la barre des 5 000 ha de submersion (alors qu'entre 1987 et 2005, le minimum observé était de ~1 000 ha).

3.2.1. Variations annuelles

Ces tendances semblent aussi se confirmer au regard des variations interannuelles des superficies en eau libre, vues à travers les variables de statistiques descriptives calculées individuellement pour chaque hydropériode annuelle (Figure 8).

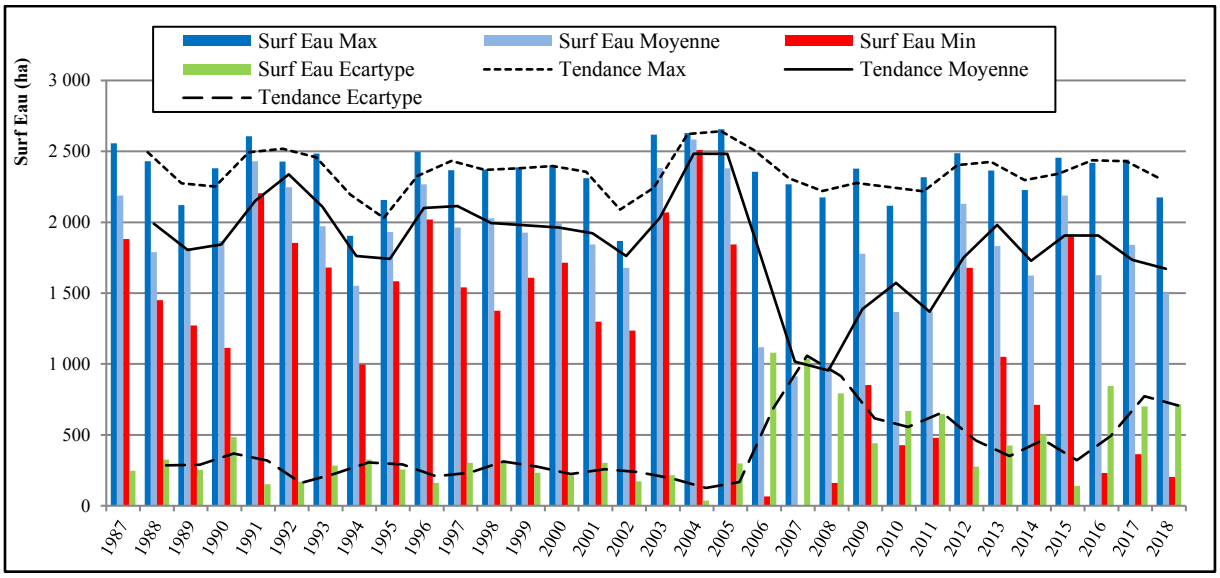


Figure 8 : Tendances des superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar) entre 1987 et 2018, avec des variables statistiques calculées pour chaque hydropériode annuelle.

En effet, selon ces dernières analyses, la tendance générale de la superficie annuelle moyenne en eau libre semble bien diminuer entre 1987 et 2018, avec une chute brutale en 2006/2007. De plus, les écart-types enregistrés de 1987 à 2005 sont beaucoup plus faibles par rapport à ceux post 2006, alors que les valeurs max n'ont pas beaucoup bougées durant les 32 années analysées et semblent plutôt stables. Cela démontre bien que les écarts entre le max et le min des superficies submergées et/ou la durée d'assèchement de la sebkha sont devenus de plus en plus importants à partir de 2006.

3.2.2. Variations saisonnières

Sur la base des résultats mensuels, les tendances des superficies en eau libre ont également été calculées pour chacune des quatre saisons entre 1987 et 2018 (Figure 9).

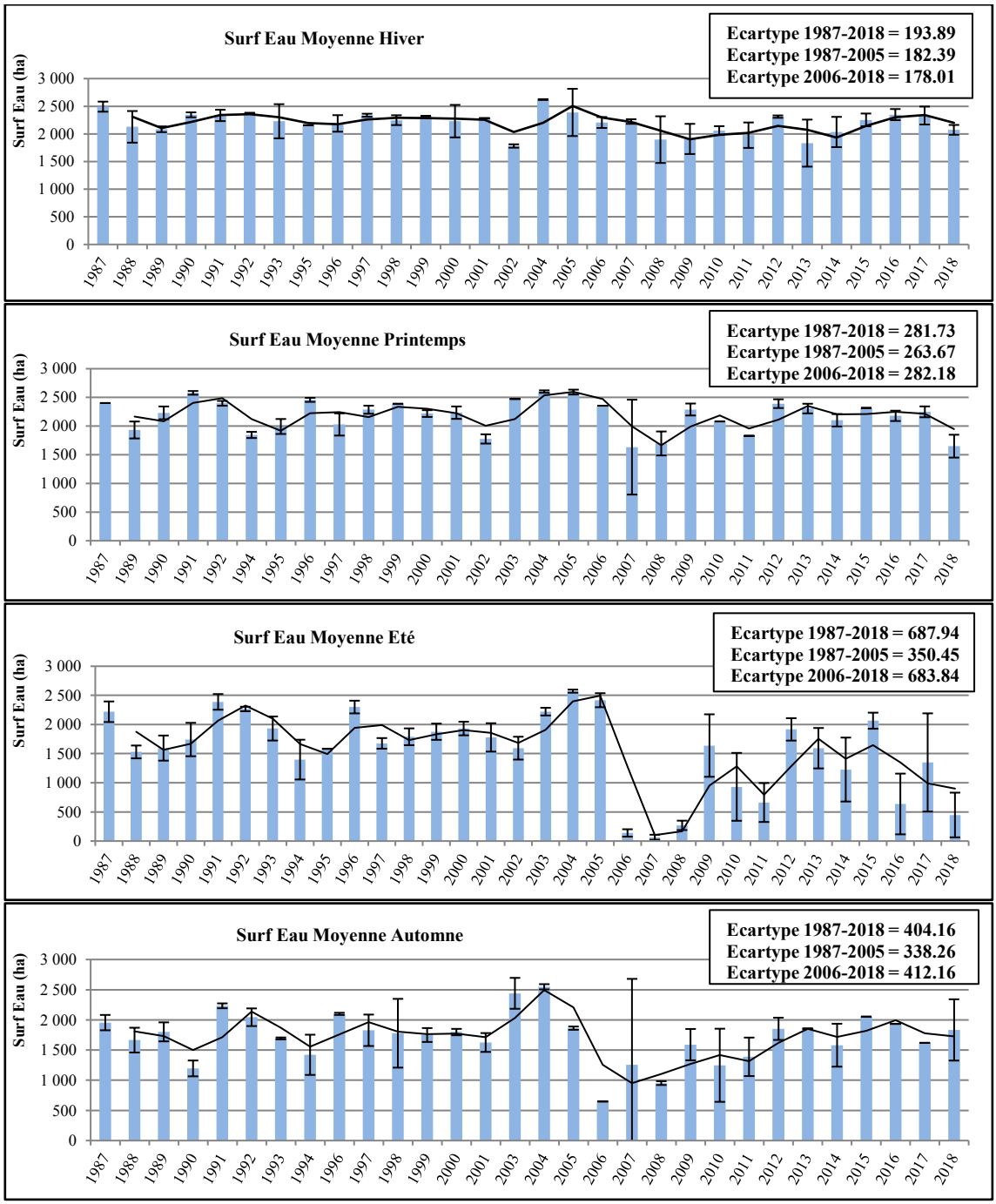


Figure 9 : Valeurs moyennes des superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar) entre 1987 et 2018, calculées pour chacune des quatre saisons définies comme suit : Hiver (Déc./Jan./Fév.), Printemps (Mar./Avr./Mai), Eté (Jun./Juil./Aout) et Automne (Sep./Oct./Nov.).

Au vu des résultats précédents, on note que les moyennes des superficies en eau libre ne bougent pas énormément d'un hiver à l'autre, restant relativement stables, y compris pour la période 2006-2018. Même constat pour les printemps, avec cependant des variations légèrement plus importantes entre les années, en particulier durant certaines d'entre elles où les niveaux des eaux de surface ont baissé en dessous des 2 000 ha (ex. 1989, 1994, 2002, 2007, 2011 ou encore 2018). Mais cela reste réparti de manière relativement homogène sur l'ensemble des 32 années étudiées (pas de grandes tendances qui se dégagent). Enfin, contrairement aux deux saisons précédentes, les comparaisons entre les moyennes des superficies en eaux libres au cours des étés et des automnes, montrent clairement des variations plus importantes d'une année sur l'autre. En effet, les écart-types calculés sont beaucoup plus grands (ce qui signifie plus de variabilité), y compris pour la phase dite « stable » entre 1987 et 2005. Ceci est particulièrement vrai pour les étés, où l'écart-type 1987-2005 (qui est déjà relativement important en comparaison avec les autres saisons) a quasiment doublé en 2006-2018 (passant de 350 ha à 684 ha). Cela est vraisemblablement dû à une diminution des apports en eau et/ou des durées de submersion pendant la seconde phase 2006-2018. En effet, les moyennes des superficies en eau libre pour celle-ci sont largement inférieures à celles de la 1ère phase 1987-2005 (passant de 1 937 ha en moyenne à 995 ha).

En conclusion, toutes ces dernières observations viennent confirmer celles détaillées précédemment (voir 4.1) et contredire la thèse selon laquelle les périodes de submersion de la zone humide naturelle de Sebkhat Séjoumi se trouvent être allongées durant ces dernières années.

3.3. Causes probables des tendances observées

Un des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'étudier les dynamiques interannuelles des eaux de surface dans les zones humides méditerranéennes est la pluviométrie (Lefebvre et *al*., 2019). En effet, celle-ci peut avoir un effet non négligeable sur les tendances enregistrées, étant donné qu'elle constitue (pour de nombreuses zones humides méditerranéennes, notamment en Afrique du Nord) une des principales sources d'alimentation en eau (Lefebvre, 2015). L'intérêt ici est donc de voir si les fluctuations observées précédemment (notamment celles dans les Figures 7 et 8) sont directement liées (ou non) aux

niveaux des précipitations enregistrées sur les mêmes échelles spatiale (l'ensemble de la zone entourant le BV de Sebkhat Séjoumi) et temporelle (1987-2018).

Pour ce faire, des données pluviométriques ont été extraites à partir du modèle climatique global CRU TS3.10, développé par Harris *et al.* (2013) et disponible via la plateforme web du *National Center for Atmospheric Research* (NCAR, 2017). Ainsi, il a été possible de caractériser les niveaux des précipitations observés dans la région du BV de Sebkhat Séjoumi pour la période 1987-2017, en se basant sur les moyennes des cumuls mensuels enregistrés sur l'ensemble du territoire (Figure 10).

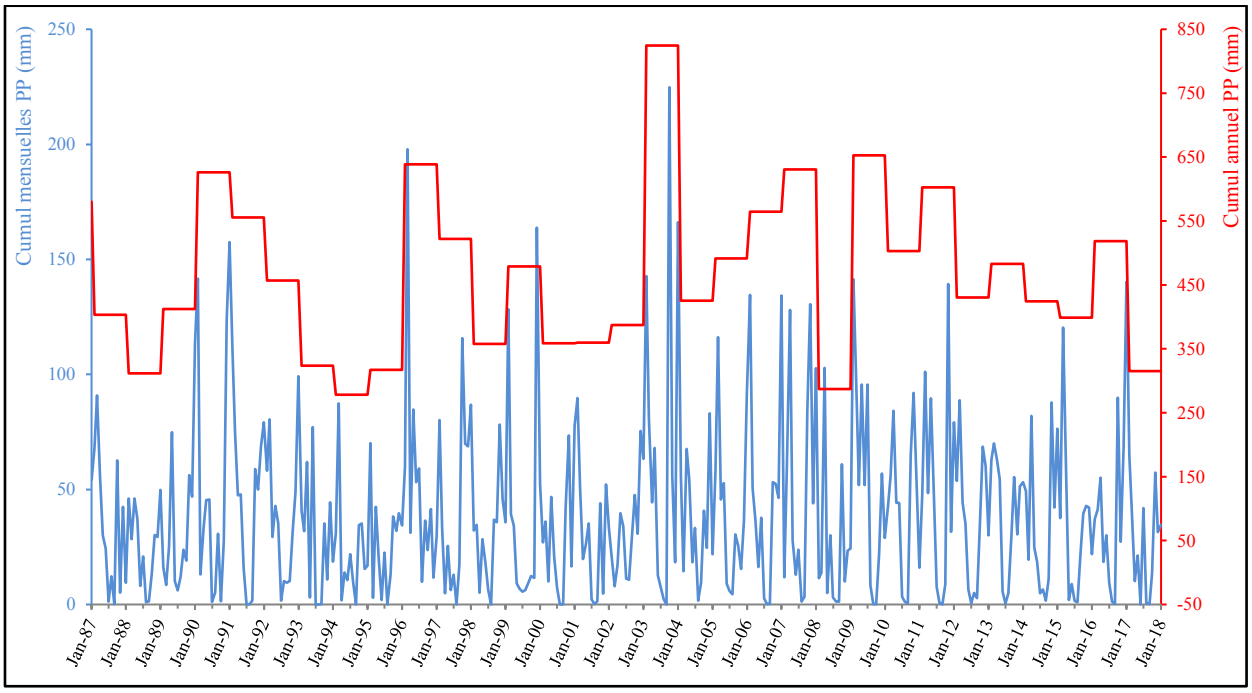


Figure 10 : Moyennes des cumuls des précipitations mensuelles (en bleu) et annuelles (en rouge) enregistrées dans la région du BV de Sebkhat Séjoumi entre janvier 1987 et décembre 2017 (source : CRU TS3.10).

L'analyse de l'évolution des cumuls des précipitations mensuelles et annuelles sur la période 1987-2017 ne semble pas refléter une quelconque tendance générale. Autrement dit, même si des pics mensuels sont régulièrement observés durant certaines années (ex. Déc. 1990, Déc. 1996, Fév. 2002, Sep. 2003 ou encore Déc. 2009), il n'y a, *a priori*, aucune tendance qui se dégage de cette série temporelle et les variations interannuelles observées semblent relativement stables (suivant les tests statistiques, pas de différence significative entre les phases 1987-2005 et 2006-2017 par ex.).

En confrontant cette série temporelle (précipitations mensuelles 1987-2017) à celle des superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi, extraites à partir des images satellites sur la même période, à l'aide de simples régressions linaires, deux constats majeurs apparaissent (Tableau 1). Le premier est que l'influence de la pluviométrie sur les surfaces en eau détectées s'observe davantage (ou de manière plus forte) au cours de la 1ère phase 1987-2005, par comparaison à la seconde phase 2006-2017 ou encore à la totalité des 3 décennies suivies (les coefficients de corrélation R sont plus élevés). Le deuxième est que, pour la 1ère phase 1987-2005 (là où l'influence des précipitations semble la plus importante), il apparait qu'il y ait une certaine « inertie » des superficies en eau libre face aux volumes d'eau apportés par les pluies au fil des mois. En effet, la corrélation entre ces deux variables augmente progressivement, au fur et à mesure que l'on remonte dans le temps (Figure 11) jusqu'à atteindre la valeur la plus fort en comparant les superficies en eau libre avec les cumuls des pluies des 6 mois précédents chaque date d'acquisition des images (R~0.7). Cette inertie s'observe également pour la seconde phase 2006-2017, mais la corrélation entre les deux variables diminue dès le 3ème mois précédant la date d'acquisition et devient même faible à partir du 5ème. Ceci est probablement dû au fait qu'au cours de cette seconde phase, la surface de la zone humide s'assèche de manière plus récurrente, de plus en plus vite et pour des périodes plus longues. Ce qui expliquerait aussi la forte corrélation avec les pluies dès le 1er mois précédant la date de prise de vue (les assèchements étant plus fréquents avec des durées en moyenne plus longues, ce qui fait que dès qu'il se mette à pleuvoir la sebkha se rempli assez vite, mais au même temps ne le reste pas pour très longtemps, d'où la faible corrélation avec les volumes des précipitations au-delà de 4 mois).

Tableau 1 : Coefficients de corrélation R entre les superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi (ha) et les cumuls des précipitations mensuelles (mm) pour les 1, 2, 3, 4, 5 et 6 mois précédant chaque date d'acquisition (en gras, les relations présentant une forte corrélation positive, où R > 0.5).

	1 mois PP	2 mois PP	3 mois PP	4 mois PP	5 mois PP	6 mois PP
1987-2017	0.3507	0.4471	0.4837	0.4583	0.4039	0.3573
1987-2005	0.3046	0.4770	**0.5741**	**0.6313**	**0.6687**	**0.6975**
2006-2017	**0.5049**	**0.5888**	**0.6161**	**0.5544**	0.4498	0.3488

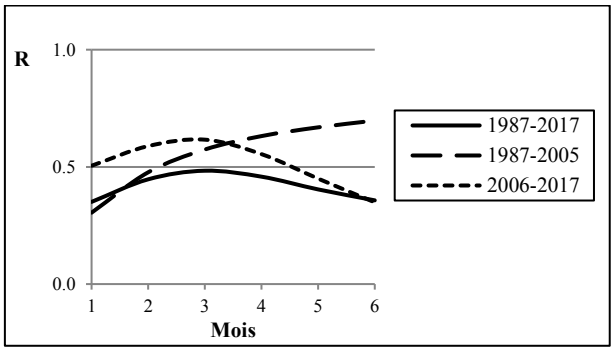


Figure 11 : Coefficients de corrélation entre les superficies en eau libre au sein de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar) et les cumuls mensuels des précipitations, en fonction du nombre de mois précédents la date d'acquisition de chaque image satellite (R > 0.5 : corrélation positive forte).

En plus des facteurs climatiques (tels que les précipitations vues précédemment), l'autre élément important à prendre en compte s'agissant des variations des niveaux d'eau de surface au sein de ce type de zone humide méditerranéenne est bien sûr l'intervention humaine. En effet, par de simples opérations de pompage, de déversement, de rétention et/ou de transfert d'eau en amont, l'Homme peut agir de manière non négligeable sur les bilans hydriques de ces écosystèmes (quantités d'eau disponibles), au risque de modifier profondément leur fonctionnement hydrologique (MWO, 2018).

Au niveau de Sebkhat Séjoumi, suite à l'épisode de crue qui a fortement marqué l'année 2003 (notamment aux abords ouest de la zone humide, dans certains quartiers de la délégation de Sidi Hassine), les autorités avaient décidé d'installer, dès 2004, trois stations de pompage (au sud, au sud-est et à l'est) afin d'évacuer les eaux en dehors du BV, par exemple via un canal vers l'oued Miliane (Chouari, 2013). En théorie, celles-ci devraient se déclencher automatiquement dès que l'eau de surface atteint la côte de 11m.

Cependant, ce système ne semble pas être sans conséquences sur l'hydrologie de Sebkhat Séjoumi, notamment sur les dynamiques intra- et interannuelles de ses eaux de surface. En particulier si une grande partie de l'eau arrivant par ruissellement pendant la période pluvieuse (de septembre à avril) est aussitôt pompée puis transférée hors de la dépression, rendant cette dernière sujette à des assèchements estivaux de plus en plus précoces, sévères et longs au fil des années (tel qu'illustré dans la Figure 12, avec les niveaux d'eau de surface dans la sebkha aux mois de juin 1987, 2000, 2010 et 2018).

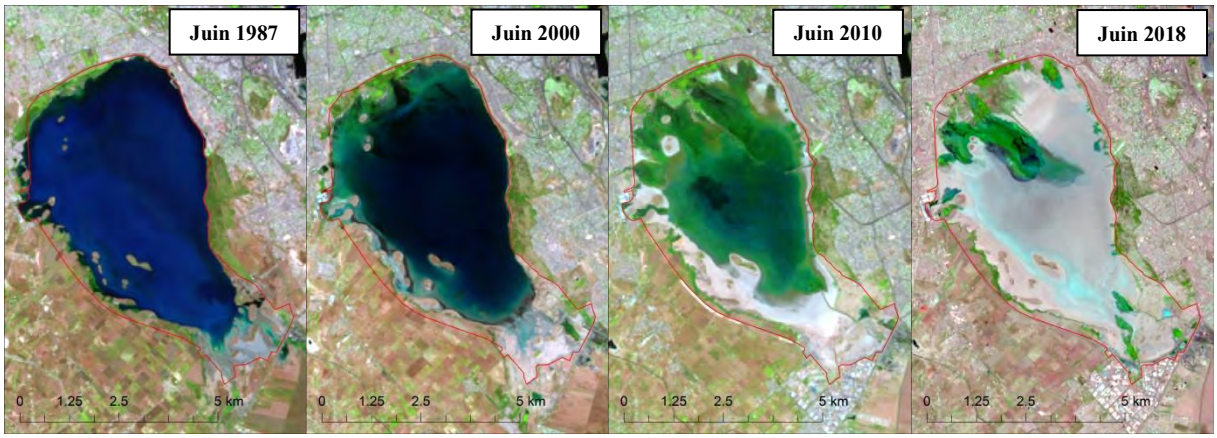


Figure 12 : Images satellites de Sebkhat Séjoumi à la même période annuelle (juin) en 1987, 2000, 2010 et 2018. A noter son assèchement progressif et de plus en plus long et précoce durant la saison estivale à cause, notamment, du système de pompage automatique mis en place à partir de 2004 (R/G/B : MIR/PIR/R).

Ce qui expliquerait d'ailleurs les différences observées entre les moyennes des superficies en eau libre enregistrées durant les étés 2006-2018 et les hivers de la même période (voir Figure 9). En effet, il se pourrait que ce changement brutal de régime soit une des conséquences directes de la mise en place de ce système de pompage, un peu plus d'un an auparavant. En outre (et d'une manière plus générale), l'implémentation de ce système pourrait même expliquer les deux grandes tendances observées dans l'évolution des superficies en eau libre de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018 (voir Figure 7 avec la 1ère et la 2ème phase, respectivement 1987-2005 et 2006-2018) et même, dans une certaine mesure, les différences entre les chiffres de corrélation avec les cumuls des pluies, notées pour ces deux mêmes phases (voir Tableau 1 et Figure 11). Autrement dit, la mise en place de système de pompage semble avoir une influence non négligeable sur l'hydrologie de la sebkha, à travers ses régimes de submersion. Cependant, des études plus approfondies sont encore nécessaires pour savoir quels en seraient les impacts sur les fonctions écologiques de la sebkha, sa biodiversité ainsi que les services écosystémiques rendus aux populations.

3.4. Conclusions sur les dynamiques des superficies en eau libre

L'étude des dynamiques des eaux de surface à l'échelle de Sebkhat Séjoumi, ainsi que de son BV, sur la période 1987-2018, révèle que ces dernières ont tendance à diminuer, notamment à l'échelle du site (2 189 ha en moyenne en 1987 contre 1 501 ha en 2018). Cette baisse ne semble pas progressive dans le temps, mais plutôt brutale avec un seuil apparu entre 2005 et 2006, définissant les deux grandes phases observées dans la série chronologique, à

savoir 1987-2005 et 2006-2018 (avec une moyenne des superficies en eau de surface de 2 045 ha pour la première et de 1 561 ha pour la seconde). En plus de ces différences interannuelles, des changements aux échelles intra-annuelles sont également notés pour les cycles pré- et post 2006. En effet, les écart-types intra-annuels (caractérisant les différences entre les valeurs élevées et faibles) sont beaucoup plus importants pour les hydropériodes appartenant à la phase 2006-2018. Ce qui signifie qu'à partir de 2006, la zone humide de Sebkhat Séjoumi s'assèche de manière plus récurrente, en atteignant même des niveaux d'eau beaucoup plus bas qu'auparavant et pour des durées plus longues.

L'étude des séries chronologiques sur les précipitations aux mêmes échelles géographique (alentour du BV de Sebkhat Séjoumi) et temporelle (1987-2017), montre qu'il existe des liens entre ces dernières et la superficie en eau libre observée à chaque date de prise de vue. Là encore, la nature de ces liens diffère selon que l'on considère les phases 1987-2005 ou 2006-2017. Durant la première, il semblerait que les superficies en eau libre soient corrélées linéairement aux cumuls des pluies, pour atteindre le plus fort taux de corrélation (R~0.7) lorsqu'on considère les cumuls des précipitations pour les 6 mois précédant chaque date d'acquisition. Cela signifie qu'il faut y avoir un cumul de pluies important pendant 6 mois au moins pour atteindre des superficies en eau libre élevés et, surtout, les maintenir à ce niveau pendant relativement longtemps (2, 3 voire 4 mois). Autrement dit, s'il y a un pic pluviométrique à un moment donné et qui ne soit pas précédé par d'importants cumuls (les 4, 5 ou 6 mois d'avant), les niveaux d'eau de la sebkha vont certes augmentés, mais ne se maintiendront probablement pas à ces valeurs hautes pendant longtemps et baisseront de manière naturelle. Durant la seconde phase 2006-2017, les superficies en eau libre semblent être corrélées avec les cumuls des pluies seulement jusqu'au 3ème mois précédant les prises de vue, pour ensuite baisser à partir du 4ème mois et atteindre même des taux de corrélation faibles pour les 5ème et 6ème mois. Cela serait lié au fait qu'au cours de cette phase, la zone humide s'asséchait de manière plus récurrente, plus rapide et plus longue, souvent indépendamment des cumuls des pluies.

Enfin, ces changements de régimes observés dans les eaux de surface de Sebkhat Séjoumi au cours des 32 dernières années (Figure 13), semblent aussi être directement liés au système de pompage automatique qui a été mis en place par les autorités publiques, à partir de

2004. Ce dernier fait partie des réponses et des mesures apportées par l'Etat pour faire face aux problèmes des inondations récurrentes dans certains quartiers riverains de la zone humide (ex. Sidi Hassine). Cependant, quelques questions se posent encore : i) au-delà des régimes hydrologiques, quel est l'impact des changements induits par ce système de pompage sur les autres compartiments écosystémiques de la sebkha (ex. sa biodiversité) ? ; ii) Quelle est son efficacité réelle, s'agissant de la protection contre les inondations ? et ; iii) Y aurait-il d'autres solutions à apporter (notamment celles basées sur la nature), au regard de la problématique concernée (gestion des risques d'inondation aux abords de la zone humide), qui semble être un peu plus systémique que le simple fait de dire que la sebkha « déborde » (ex. l'urbanisation galopante au détriment des espaces naturels et agricoles et sur des zones potentiellement inondables, ou encore l'obstruction à l'écoulement de certains cours et voies d'eau alimentant la sebkha) ?

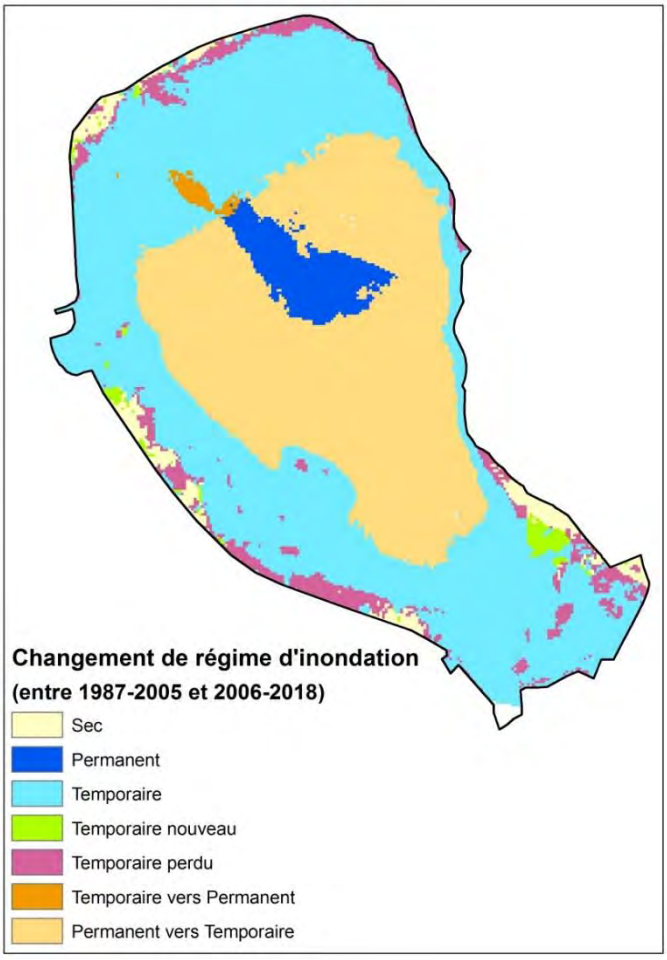


Figure 13 : Carte représentant les changements des régimes des eaux de surface au niveau de Sebkhat Séjoumi (limites Ramsar), entre les périodes 1987-2005 et 2006-2018.

4. Résultats du suivi de l'occupation du sol

L'utilisation des images satellites a permis de cartographier et de suivre les dynamiques de l'occupation du sol à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi pour chacune des hydropériodes annuelle 1987, 2000, 2010 et 2018 (respectivement Figures 14, 15, 16 et 17). Les résultats des tests de validation, réalisés à l'aide de l'outil en ligne LACO-Wiki sur les deux cartes les plus récentes (voir Annexe 3), ont montré des taux de précision globale de l'ordre de de 84.2 % pour celle de 2010 (coefficient de Kappa égal à 0.83) et 86.2 % pour celle de 2018 (coefficient de Kappa égal à 0.85). Selon les auteurs Congalton (1994) et Thomlinson et *al*. (1999), ces derniers peuvent être considérés comme suffisamment fiable pour refléter la réalité observée sur le terrain.

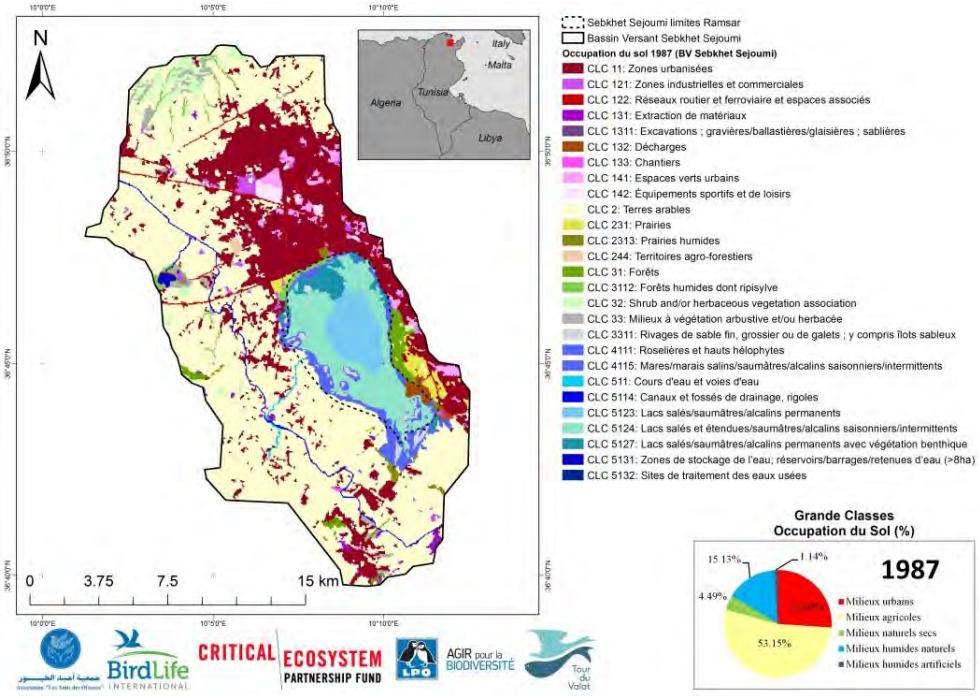


Figure 14 : Carte d'occupation du sol 1987 à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi.

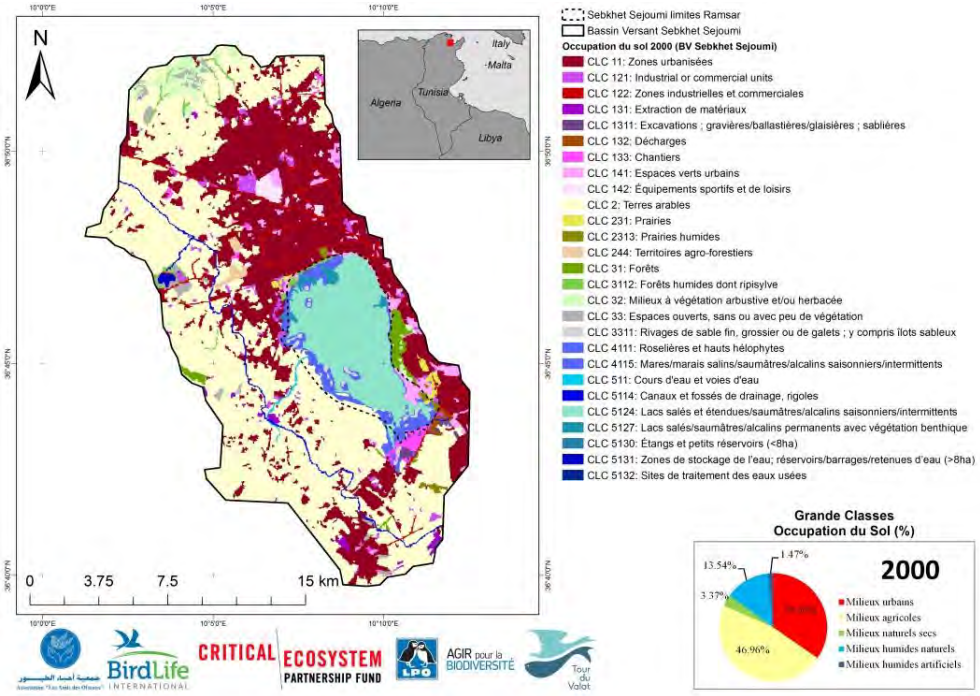


Figure 15 : Carte d'occupation du sol 2000 à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi.

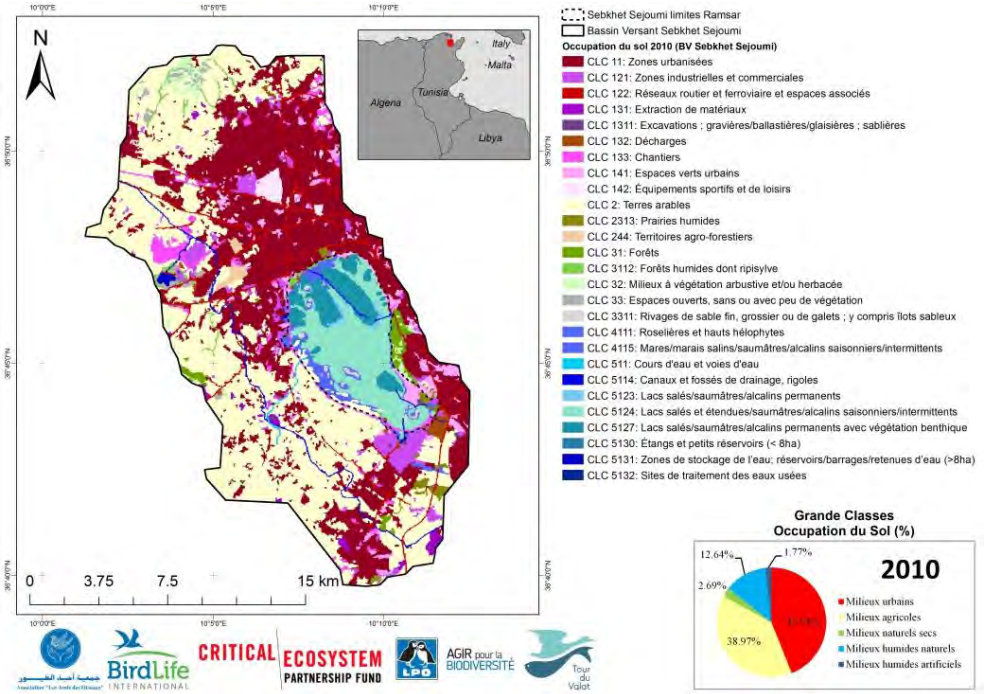


Figure 16 : Carte d'occupation du sol 2010 à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi.

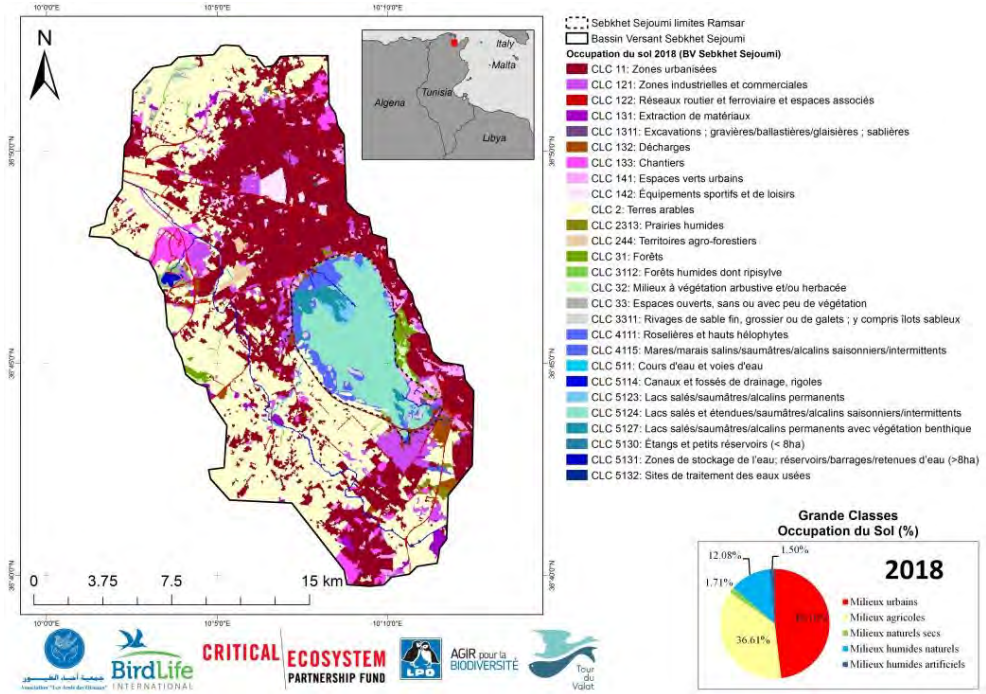


Figure 17 : Carte d'occupation du sol 2018 à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi.

4.1. Tendances générales

Selon les résultats de la Figure 18, on constate que l'occupation et l'usage des sols à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi sont en perpétuelle évolution depuis la fin des années 80. En effet, aucune des dynamiques surfaciques observées pour les cinq grandes classes cartographiées (Milieux urbains[2], Milieux agricoles, Milieux naturels secs, Milieux humides naturels et Milieux humides artificiels) ne semble se stabiliser au fil du temps. En outre, mis à part les milieux humides artificiels, on note également que ces évolutions vont toujours dans un sens unique : soit en augmentant ou bien en déclinant, mais avec des vitesses variables.

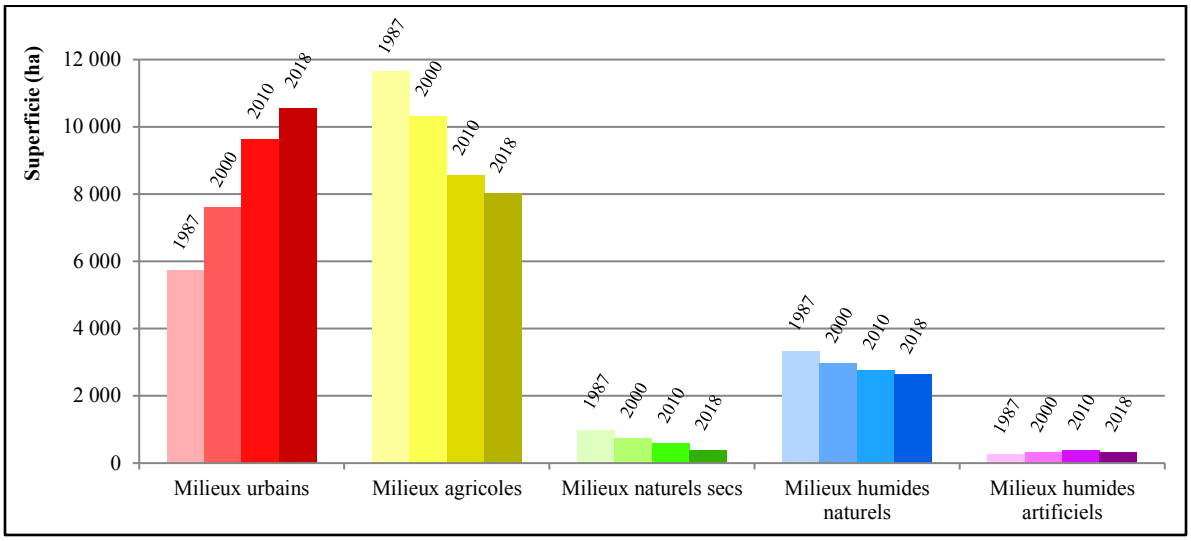


Figure 18 : Evolution des grandes classes d'occupation du sol au sein du BV de Sebkhat Séjoumi, entre les hydropériodes annuelles1987, 2000, 2010 et 2018.

En 1987, la zone d'étude était largement dominée par les terres cultivées (53.15 %). Cette configuration paysagère semble avoir perduré jusqu'à la fin des années 90 et le début des années 2000. A partir de cette période, tout en restant le type d'habitat dominant, la superficie de ces milieux est passée sous les 50 % du taux de recouvrement total, pour atteindre 46.96 % en 2000. Entre 2000 et 2010, ce sont les zones urbaines et les espaces bâtis qui prennent la part la plus importante du taux de recouvrement parmi les cinq grandes catégories et dépassent, de fait, les milieux agricoles (avec respectivement 43.94 % et 38.97 % en 2010). Cette tendance se confirme encore en 2018, avec une augmentation des surfaces imperméabilisées (bâties) et

[2] Les « Milieux urbains » ici sont définis au sens très large. Ils désignent l'ensemble des espaces bâtis, incluant les habitations, les sites industriels, les réseaux de transport, les espaces de sport et de loisir, les sites d'extraction de matériaux, les décharges ou encore les chantiers.

un léger recul des terres arables (respectivement +4.16 % et -2.36 %). Les milieux humides naturels, représentés ici essentiellement par les habitats composant la sebkha (le lac salé saisonnier, les marais saumâtres intermittents qui l'entourent ainsi que les berges et les îlots sableux) arrivent en troisième position en terme de recouvrement spatial à l'échelle du BV (variant de 15.13 % à 12.08 % entre 1987 et 2018). Arrivent enfin les milieux naturels secs (forêts et autres écosystèmes à végétation arbustive et/ou herbacée, plus ou moins clairsemée et sur sol sec) et les milieux humides artificiels, avec les plus faibles taux de recouvrement à l'échelle de l'ensemble du territoire (respectivement 1.71 % et 1.50 % en 2018).

4.2. Dynamiques des conversions

Selon le Tableau 2, reportant les surfaces des changements observés entre 1987 et 2018 au sein des 5 grandes catégories d'occupation du sol, ce sont les milieux naturels secs qui ont le plus régressé d'un point de vue proportionnel (avec -62 %), suivi par les milieux agricoles et les milieux humides naturels (respectivement -31 % et -20 %). Cependant, en perte nette, ce sont bien les terres arables qui reculent le plus, avec -3 630 ha durant les 30 dernières années. L'analyse de la matrice des changements (Tableau 3) démontre que les superficies cultivées perdues, l'ont été essentiellement à cause des conversions en zones urbaines et imperméabilisées (à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi, plus de 37 % des terrains cultivés en 1987 sont désormais des espaces bâtis).

Tableau 2 : Evolution des cinq grandes catégories d'occupation du sol au sein du BV de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018 (en ha et en %), ainsi que pour chaque pas de temps étudié (en ha).

	1987-2018	1987-2018 %	1987-2000	2000-2010	2010-2018
Milieux urbains	4 830.89	84%	1 881.03	2 036.46	913.39
Milieux agricoles	-3 630.11	-31%	-1 357.96	-1 754.60	-517.56
Milieux naturels secs	-610.39	-62%	-245.91	-150.07	-214.41
Milieux humides naturels	-669.47	-20%	-350.02	-197.73	-121.71
Milieux humides artificiels	79.08	32%	72.86	65.93	-59.71

Tableau 3 : Matrice des conversions observées pour les cinq grandes catégories d'occupation du sol au sein du BV de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018 (en %).

		1987				
		Urb.	Agri.	M. Nat. Sec.	M. Hum. Nat.	M. Hum. Art.
2018	Urb.	97%	37%	19%	15%	26%
	Agri.	3%	62%	48%	4%	17%
	M. Nat. Sec.	0%	0%	32%	1%	1%
	M. Hum. Nat.	0%	0%	1%	78%	1%
	M. Hum. Art.	0%	1%	0%	2%	54%

4.3. Expansion urbaine et des terrains bâtis : le vrai moteur des changements

Entre 1987 et 2018, la superficie des milieux urbains a augmenté de plus de 84 % à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi, passant de 5 722 ha à 10 553 ha (voir Figure 18 et Tableau 2). Cette expansion s'est faite essentiellement au détriment des terres arables, suivies des milieux humides naturels puis, à moindre mesure, des milieux naturels secs et des milieux humides artificiels (Figure 19).

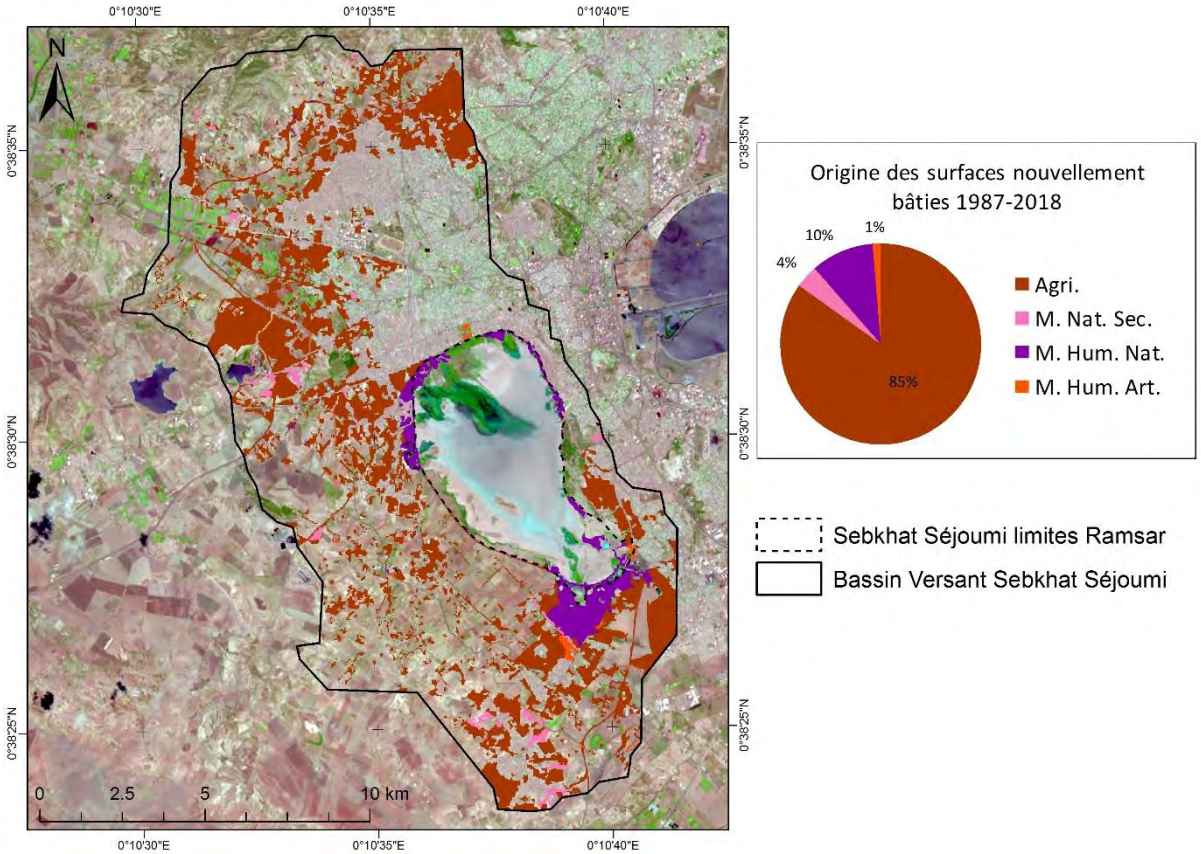


Figure 19 : Etalement des zones de bâtis entre 1987 et 2018 au sein du BV de Sebkhat Séjoumi.

Sur le plan des dynamiques spatiales, l'étalement urbain s'est fait de manière relativement homogène d'un pas de temps à l'autre et sur l'ensemble du territoire (Figure 20). Cependant, quelques différences notables sont observées dans les types de conversion des terres. En effet, en analysant de plus près les cartes des Figures 14 à 17 et celle de la Figure 20, on constate que pour les milieux humides naturels, les pertes les plus importantes ont été enregistrées essentiellement durant la période 1987-2000. En particulier au sud de la sebkha, où la construction d'une importante zone industrielle a été entamée pendant les années 1990

(celle d'El Mghira), à l'intérieur même de la cuvette formant la zone humide et au détriment de près de 250ha de marais, berges et îlots naturels (Figure 21).

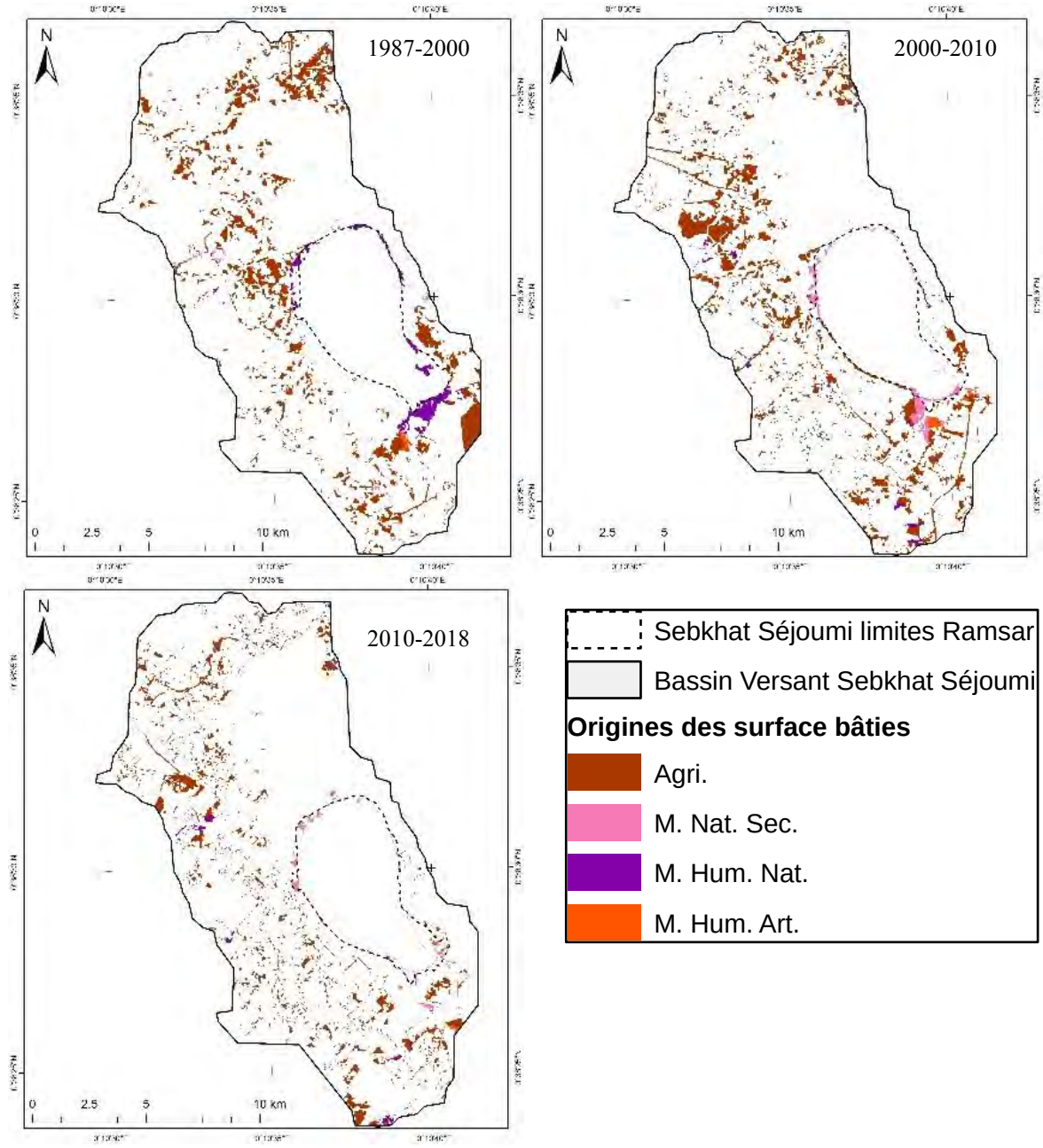


Figure 20 : Origines et distribution spatiale des surfaces nouvellement bâties au sein du BV de Sebkhat Séjoumi pour chacun des 3 pas de temps.



Figure 21 : Développement de la zone industrielle d'El Mghira (encerclée en rouge sur ces 4 images satellites) :
a) 1987 : le site est encore quasi vierge de toute construction ;
b) 2000 : les chantiers ont déjà débuté, tandis que les berges et les marais sont asséchés puis comblés ;
c) 2010 : la plus grande partie de la zone industrielle est déjà construite et ;
d) 2018 : situation actuelle, où près de 300 ha (essentiellement des habitats humides naturels, mais aussi quelques terrains agricoles) ont été transformés en zone industrielle.

En ce qui concerne les milieux agricoles, tel qu'illustré dans la Figure 22, ce sont les transformations en habitations et autres espaces annexes (ex. écoles, marchés, espaces de loisir…etc.) qui dominent, avec plus de 66 % des conversions. Le reste étant en zones industrielles, décharges, sites d'extraction de matériaux, ou encore des chantiers toujours en cours en 2018. De plus, même si les pertes à cause de l'urbanisation galopante ce sont faites de manière continue entre 1987 et 2018, il semblerait que le pic des conversions ait été durant les décennies 1990 et 2000 (plus de 1 900 ha transformés en terrains bâtis et à chacun des pas de temps 1987-2000 et 2000-2010). Contrairement à la période 2010-2018, où les pertes ne représentent que 1 190 ha. Ceci attesterait, peut-être, d'un ralentissement de l'expansion urbaine durant ces dernières années. Cependant, en l'absence d'informations récentes permettant de corroborer cette hypothèse, il est difficile d'affirmer cela avec une grande certitude.

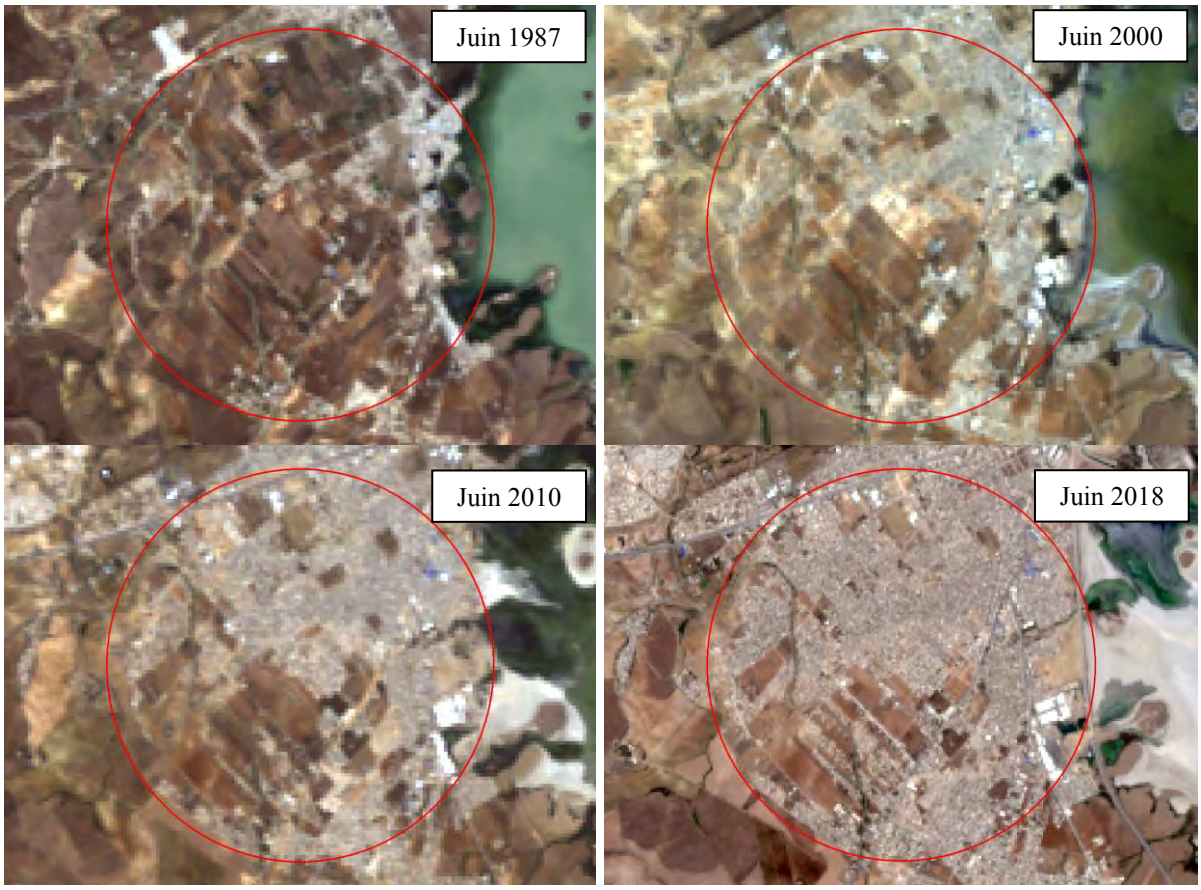


Figure 22 : Expansion de la ville de Sidi Hassine (à l'ouest de Sebkhat Séjoumi, encerclée en rouge ici) entre 1987 et 2018, au détriment des terres arables, mais également d'une partie des berges de la sebkha.

Outre le recul net des superficies arables au profit du bâti, une autre conséquence indirecte du mitage agricole serait la saturation de la nappe phréatique du BV de Sebkhat Séjoumi. En effet, depuis les années 1970, son niveau aurait sensiblement monté (Gammar et Chaouech, 2003) et, selon Chouari (2013), ceci résulterait essentiellement de la baisse des prélèvements par pompage pour l'irrigation des terres, suite au recul des activités agricoles.

4.3.1. Principales causes de l'étalement urbain et des terrains bâtis

Selon Chouari (2019), l'urbanisation rapide observée autour de Sebkhat Séjoumi, en particulier dans les zones de plaine, est le résultat d'un exode rural massif qui a débuté dès les années 1970. Celui-ci était soutenu par plusieurs vagues successives inhérentes à la crise agricole tunisienne, avec la détérioration des structures sociales paysannes et la montée du chômage dans les campagnes (Chouari, 2019), en lien direct avec les difficultés sociales et économiques rencontrées par les populations rurales, notamment celles de l'intérieur du pays,

depuis de nombreuses années (Elloumi, 2013). En outre, malgré la dominance des espaces agricoles dans les plaines du Séjoumi, leur position périurbaine du Grand Tunis les a rendus particulièrement attractives (Bouraoui et Donadieu, 2004). Les nouveaux arrivants n'avaient alors guère le choix que de s'y installer, généralement sur des sites impropres à l'urbanisation (Chouari, 2013). Ceci a conduit même à une importante densification de la population dans des zones potentiellement inondables (Chouari, 2019).

En effet, même si des données historiques fiables manquent à ce jour, en analysant des statistiques démographiques relativement récentes (entre 2004 et 2014), on constate que les délégations (unités administratives en Tunisie) ayant connu les plus fortes augmentations au sein de leurs populations, se situent essentiellement autour de la sebkha, notamment à l'ouest et au sud de celle-ci, là où le paysage est dominé par des plaines agricoles (Figure 23).

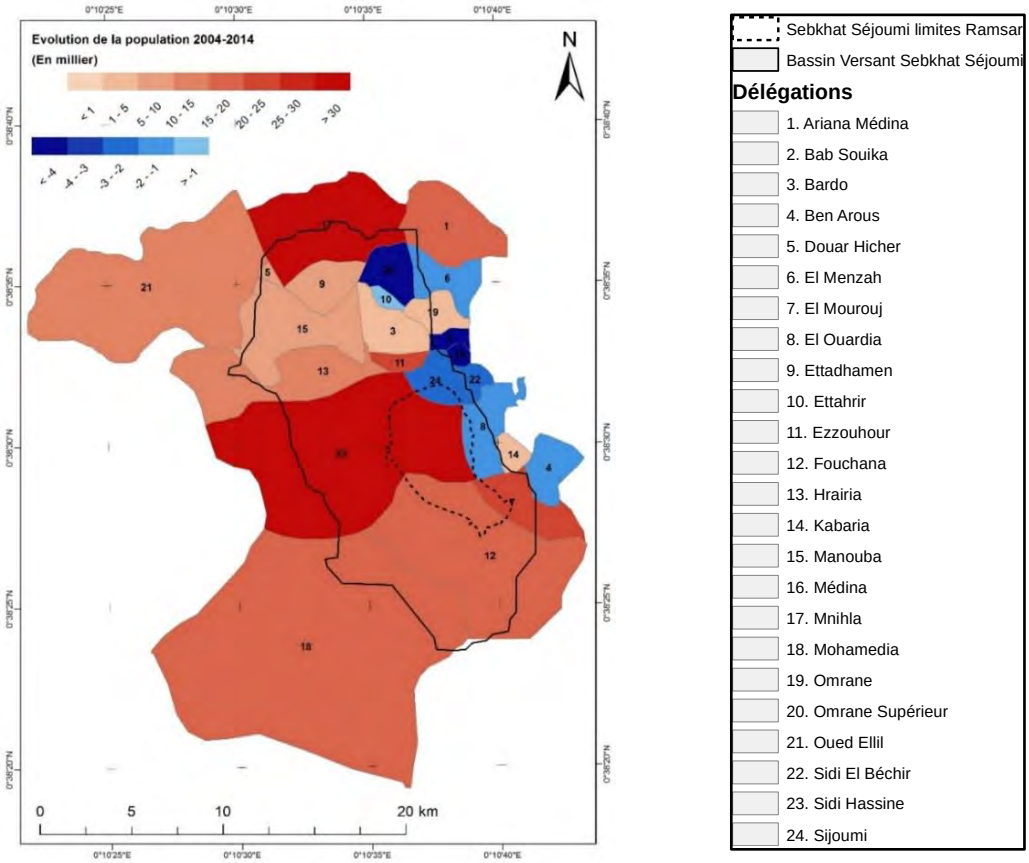


Figure 23 : Evolution de la population totale entre 2004 et 2014 des délégations dont les limites administratives sont intersectées par celles du BV de Sebkhat Séjoumi (source : Institut National de la Statistique).

Ceci est particulièrement vrai pour les délégations de Sidi Hassine, El Mourouj, Ezzouhour, Mohamedia et Fouchana, où on a enregistré 5 des 6 augmentations les plus importantes en chiffres absolus (entre 18 000 et 25 000 nouveaux habitants entre 2004 et 2014, voire même dépassant les 30 000 à Sidi Hassine). Cependant, il faut souligner que l'accroissement de la population le plus élevé sur l'ensemble du territoire étudié reste celui de Mnihla, tout au nord du BV de Sebkhat Séjoumi, dans le gouvernorat de l'Ariana (avec plus de 35 000 habitants de plus pour la même période 2004-2014).

A la lumière de ces résultats, il devient alors logique de penser que l'expansion urbaine très rapide observée précédemment soit la résultante directe de cette pression démographique intense (elle-même engendrée par un exode rural massif depuis près de 50 ans) sur des terrains « facilement constructibles » dans la proche-banlieue de Tunis. Ceci dit, ce phénomène n'est pas sans conséquences et les bouleversements qu'il engendre ont un impact considérable sur les populations humaines, qui en sont en partie à l'origine, mais également sur l'écosystème naturel de Sebkhat Séjoumi et sa biodiversité, ainsi que sur les paysages agricoles qui l'entourent.

4.4. Impacts de l'expansion urbaine et des terrains bâtis

4.4.1. Imperméabilisation des sols et risques liés aux crues et aux inondations

Au-delà de la perte nette des habitats naturels et agricoles, une des principales conséquences de l'expansion urbaine et des espaces bâtis est bien évidemment l'imperméabilisation des sols. En outre, lorsque celle-ci se situe au sein des périmètres potentiellement inondables (ex. les plaines alluviales et les zones d'épandage des cours d'eau naturels), le risque de voir les dégâts causés par les phénomènes de crues catastrophiques se multiplier devient de plus en plus grand. Or, il s'avère qu'une grande partie de ces terrains nouvellement gagnés par le bêton et les constructions en dur entre 1987 et 2018, se trouve justement dans ces zones à risque.

En se basant sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM 1 arc-s Global DEM (à ~25 m de résolution spatiale), combinés avec quelques informations, même fragmentaires,

sur des crues historiques survenues dans la région (ex. celles de 2003, 2007 ou encore 2012), il a été possible de modéliser l'ensemble du territoire en fonction du risque d'inondation[3] et de débordement, selon la méthode proposée par Manfreda et *al*. (2011). Le résultat est une cartographie du BV (Figure 24), où 4 classes de risques ont été identifiées : 1) Faible ; 2) Modéré ; 3) Fort et ; 4) Très fort. Ceci, en tenant compte également des distances en fonction de la pente, calculées à partir des principaux cours d'eau et des zones d'accumulation des flux.

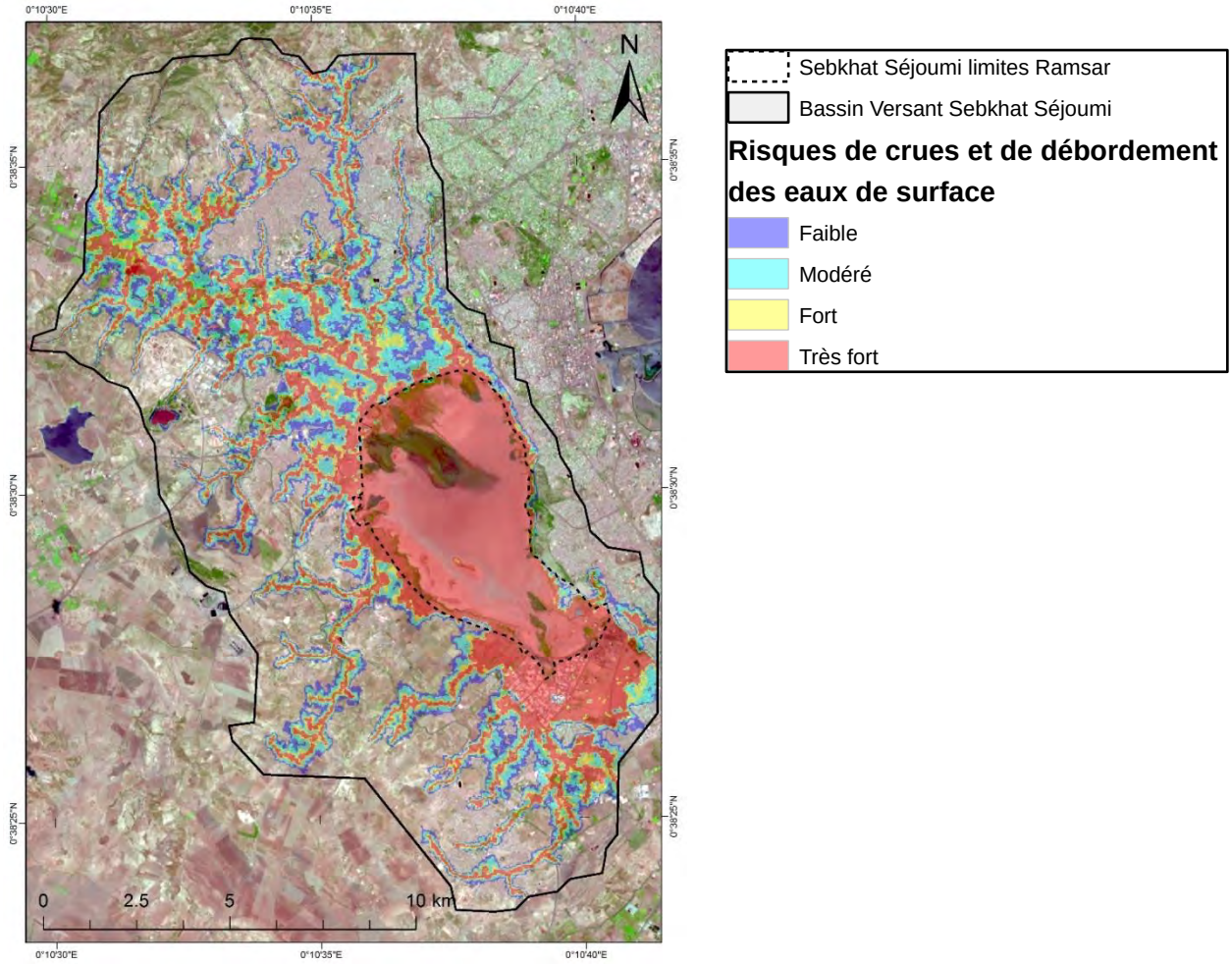


Figure 24 : Représentation des risques de crues et de débordement des eaux de surface, estimés à partir du MNT SRTM 1 arc-s Global DEM et d'information sur des crues historiques survenues dans la région du BV de Sebkhat Séjoumi.

Cependant, il faut noter ici qu'il ne s'agit que d'une modélisation basée uniquement sur des paramètres hydro-morphologiques et que des améliorations sont encore possibles. Notamment avec l'intégration d'autres données hydrologiques (ex. les écoulements de surface,

[3] Dans ce contexte, le terme « inondation » est utilisé dans le sens de l'aléa naturel et non dans celui de la présence d'eau de surface (comme c'était le cas dans les chapitres précédents).

les apports des précipitations et l'évapotranspiration), hydrogéologiques (ex. la perméabilité des sols et les interactions avec les eaux souterraines), ou encore celles spécifiques aux aménagements déjà en place ainsi que leur état (ex. les digues et les chenaux le long de certains cours d'eau). Cela-dit, à ce stade de l'analyse, cette carte permettra surtout d'avoir une première estimation des enjeux socio-économiques liés aux risques de crues et de débordements des eaux de surface à l'échelle du BV de Sebkhat Séjoumi, en la croisant par exemple avec celles de l'occupation du sol élaborées précédemment (Figure 25. Voir aussi l'Annexe 4 pour la méthode utilisée afin de caractériser les enjeux socio-économiques face aux risques de crue et d'inondation).

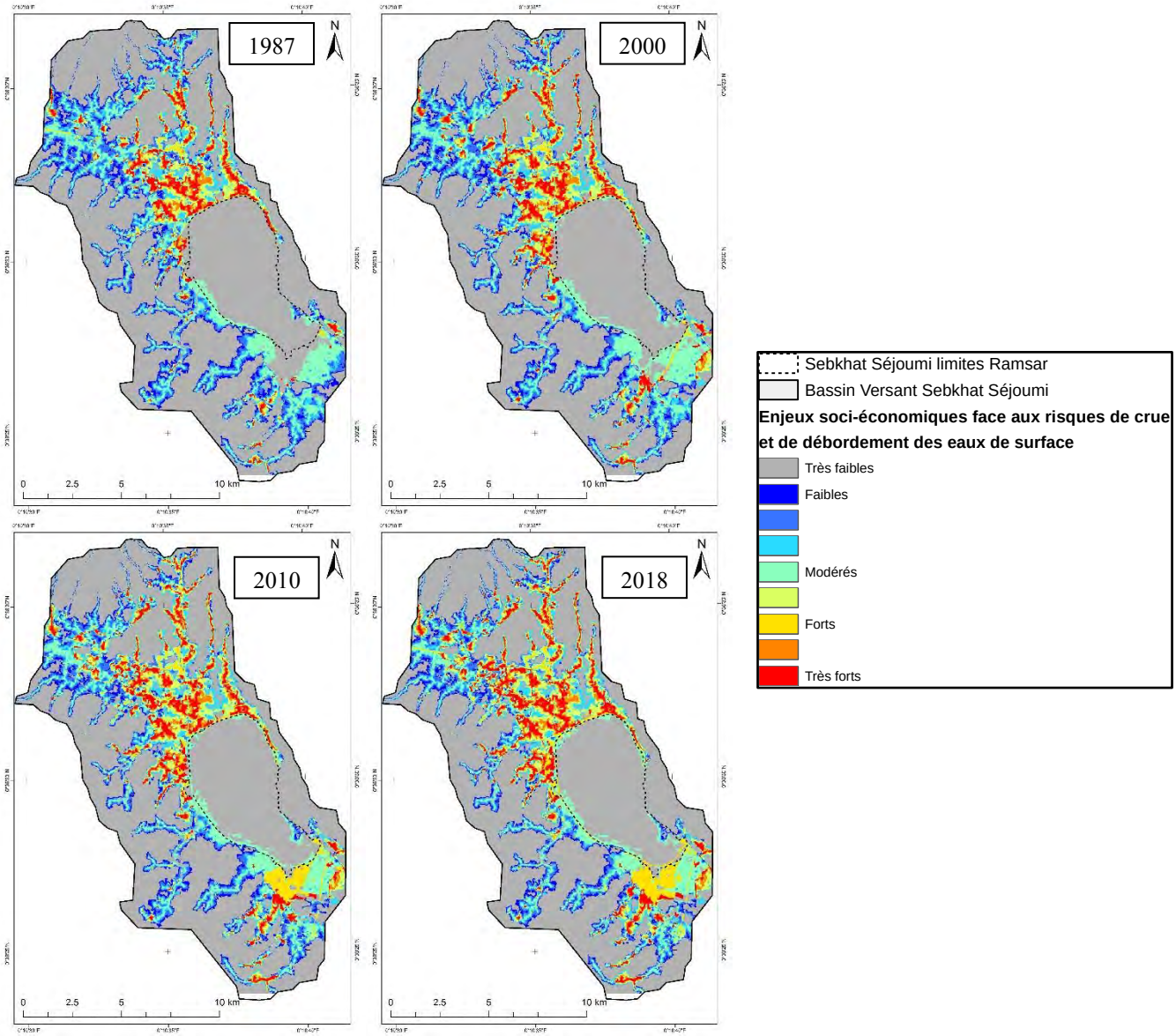


Figure 25 : Dynamiques spatiales des enjeux socio-économiques face aux risques de crue et de débordement des eaux de surface au sein du territoire du BV de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018.

Même si, selon la Figure 25, la grande majorité du territoire représente des enjeux socio-économiques très faibles vis-à-vis des risques d'inondation et de crue (61 % en 1987, passant à 58 % en 2018), il est important de souligner qu'en 1987, près de 6 % de la surface du BV abritait des zones à enjeux forts (voire très fort pour la moitié d'entre elles) et que ce pourcentage à presque doublé en 30 ans, pour passer à 11 % en 2018 (dont 5 % à risques très forts). Ajouter à cela les zones à enjeux modérés, on passe au 1/3 de l'ensemble du territoire en 2018 (soit plus de 7 000 ha). De plus, en observant les graphiques de la Figure 26, on note que ce sont les superficies où les enjeux socio-économiques sont forts, voire très forts, qui augmentent le plus rapidement au fil du temps.

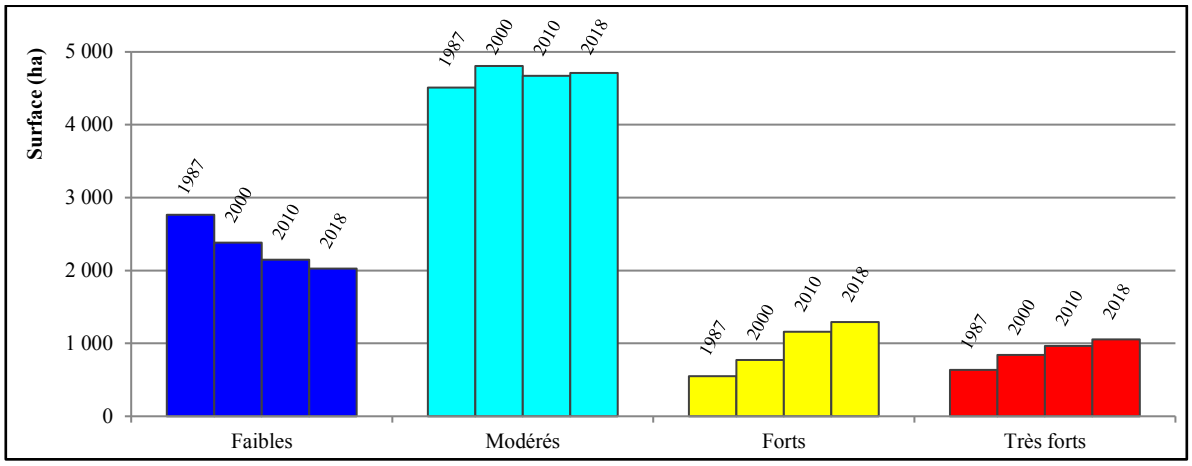


Figure 26 : Evolution des enjeux socio-économiques (représentés ici en superficies) face aux risques de crue et de débordement des eaux de surface au sein du territoire du BV de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018.

Ces derniers résultats (Figures 25 et 26) suggèrent alors que, malgré la présence de zones à risque élevé (selon la carte de la Figure 24, ~35 % de l'ensemble du BV de Sebkhat Séjoumi est en risque Fort à Très fort face aux phénomènes de crues et de débordement des eaux de surface), force est de constater que, sur les 4 830 ha de terrain nouvellement bâtis entre 1987 et 2018, près du 5ème l'ont été sur ces zones justement (en plus, bien évidemment, de tout ce qui était déjà bâti sur ces zones avant 1987). De ce fait, cette configuration territoriale, induite par ce modèle de développement urbain qui ne tiendrait pas assez compte des risques liés aux crues et aux inondations, contribue fortement l'aggravation des dégâts et des pertes (matérielles, mais également humaines) causés par ces phénomènes lorsqu'ils surviennent, même à faible ampleur.

Enfin, ajouté au fait que la superficie totale de la sebkha (en tant qu'ensemble d'habitats humides naturels) soit de plus en plus restreinte par le remblaiement graduel de ses berges au fil des ans, l'artificialisation croissante des sols au sein de son BV augmenterait sensiblement le risque de son engorgement rapide en eau (et par conséquent, son débordement). En effet, selon Chouari (2013), la saturation de la nappe phréatique suite à la réduction des prélèvements agricoles ces dernières années (donc la remontée de son niveau moyen), combinée à la diminution du taux d'infiltration des eaux de surface dans certaines parties du bassin (liée à l'imperméabilisation progressive des sols), mais également au fait qu'elles ruissellent désormais en grande quantité directement vers la cuvette abritant la zone humide, contribueraient à surcharger, de façon non négligeable, sa capacité naturelle de stockage. Celle-ci ne jouerait plus alors pleinement son rôle de régulation et de contrôle des crues et d'atténuation de leurs effets dévastateurs, en absorbant une grande partie de l'excédent d'eau de surface déversée par son bassin versant.

4.4.2. Consolidation des berges et impacts sur l'écosystème de la sebkha

Entre 1987 et 2018, les limites externes des habitats humides formant l'écosystème de Sebkhat Séjoumi se sont vu fortement réduire et les berges de cette dernière ont reculé jusqu'à 500 m au nord-ouest de celle-ci, voire même de plus de 1.5 km au sud (suite à la construction de la zone industrielle d'El Mghira). Coté nord-est, les retraits sont moins marqués, mais peuvent atteindre jusqu'à 200 m par endroit (Figure 27).



Figure 27 : Recul des berges de Sebkhat Séjoumi entre 1987 et 2018, suite aux remblaiements et aux constructions successifs.

On estime donc que la sebkha[4] aurait perdu près du 1/5ème de la superficie de ses habitats humides (-20%, passant de 3 150 ha en 1987 à 2 526 ha en 2018), à cause notamment du grignotage continuel de ses berges par les remblaiements et les constructions successifs.

L'impact de ces aménagements sur la structure et le fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème humide est considérable. En effet, selon la typologie Ramsar, Sebkhat Séjoumi est une zone humide dominée par la classe « Lacs et étendues d'eau salés/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents » (RSIS, 2016). Ses différentes fonctions (hydrologiques, biogéochimiques et biologiques) sont donc fortement régies par la nature même de ces régimes d'eau de surface (Skinner et Zalewski, 1995). De plus, en Méditerranée, ce type de zones humides se caractérise par une dépression peu profonde renfermant de l'eau pendant des périodes plus ou moins longues de l'année, mais rarement en permanence sur la majorité de son étendue et s'asséchant, généralement, au plus fort de l'été (Pearce et Crivelli, 1994). Le fait

[4] Le terme « sebkha » est utilisé ici au sens écosystémique. Il inclue l'ensemble des habitats humides naturels composant l'écosystème. A ne pas confondre donc avec le site Ramsar, dont les limites sont de nature plus administrative et fixes dans le temps. Ni avec les superficies en eau qui varient selon les saisons et les années, mais à l'intérieur des habitats composant la sebkha (ex. le lac salé saisonnier/intermittent).

donc de remblayer les berges va non seulement réduire les superficies des habitats humides naturels en les détruisant, mais également casser les pentes douces qui caractérisent ce type de zone humide et diminuer sensiblement les superficies où les étendues d'eau peu profonde peuvent varier au fil des saisons. Le risque serait alors une modification significative du fonctionnement hydrologique de l'écosystème, en transformant des zones qui étaient naturellement inondées de manière temporaire en des étendues submergées en quasi-permanence. De même que cela augmenterait le risque d'érosion hydrique des zones consolidées nouvellement créées le long des berges.

C'est d'ailleurs ce qui est proposé dans les trois différentes variantes du projet d'aménagement et de valorisation de Sebkhat Séjoumi dans sa forme actuelle où, en plus du remblaiement et de la consolidation des berges (et de la destruction totale des îlots pour la variante 3), il est même suggéré de sur-creuser tout le pourtour du lac afin d'augmenter sa capacité volumique (MEHAT, 2017). Ceci mettrait alors dangereusement en péril la biodiversité exceptionnelle qu'abrite ce site, en particulier les oiseaux d'eau. En effet, selon Sayoud et *al*. (2017), on estime que Sebkhat Séjoumi renfermerait la troisième plus grande abondance en oiseaux d'eau de toute la Tunisie (après le lac Ichkeul et les Iles Kneïss) et ferait même partie des 10 sites les plus importants pour ces espèces parmi toutes les zones humides d'Afrique du Nord (du Maroc à l'Egypte). Le dégrader davantage, en modifiant par exemple la structure de ses berges ainsi que les nombreux îlots qu'il abrite, serait alors une véritable catastrophe d'un point de vue écologique et toutes les populations d'oiseaux d'eau qui en dépendent pourraient tout simplement disparaître du paysage local (voire national), comme ce fut le cas pour le complexe lagunaire de Tunis quelques années auparavant. En effet, même si les autorités préfèrent mettre en avant les prouesses techniques et d'ingénierie ayant abouti aux aménagements des Lacs Nord et Sud de Tunis, le fait est que les conséquences à court, moyen et long terme des travaux réalisés sont considérables, comme par exemple la réduction drastique de la superficie des deux parties de la lagune (pour la partie sud, de 1 600 ha à 710 ha), ou encore la disparition des salines privant la faune d'une réserve nourricière très abondante. Résultat, la biodiversité en est sortie extrêmement appauvrie : disparition quasi-totale des flamants roses (*Phoenicopterus roseus*) et d'autres oiseaux rares du site, comme l'érismature à tête blanche (*Oxyura leucocephala*) ou le pluvier argenté (*Pluvialis squatarola*) et destruction totale des steppes halophiles du pied des collines des communes de Radès et de Mégrine (Barthel, 2006).

4.5. Conclusions sur les dynamiques d'occupation du sol

Sur la période 1987-2018 les superficies des cinq grandes classes d'occupation du sol (Milieux urbains, Milieux agricoles, Milieux naturels secs, Milieux humides naturels et Milieux humides artificiels) semblent toutes évoluer rapidement. Ceci traduit d'une politique d'aménagement du territoire, certes pas toujours pensée et contrôlée, mais très dynamique sur l'ensemble du territoire couvrant le BV de Sebkhat Séjoumi, avec des changements d'usage et d'occupation continuels et rapides. En effet, en l'espace de trois décennies seulement, on est passé d'un paysage général dominé largement par les terrains agricoles (plus de la moitié du taux de recouvrement total avant 1987), à celui où c'est désormais le bâti et l'urbanisation qui s'imposent (plus de 48% des surfaces en 2018. Quant aux terres arables, elles ont reculé jusqu'à atteindre moins de 37% la même année).

Sans surprise donc, les conversions des terres les plus importantes, en chiffres absolues, sont celles de l'agriculture vers le bâti (près de 4 260 ha entre 1987 et 2018). Cependant, les autres types d'habitats ne sont pas en reste : 48 % des milieux naturels secs et 4 % des milieux humides naturels en 1987 ont été transformés en agriculture en 2018 (respectivement 469 ha et 123 ha). Dans le même ordre, 19 % et 15 % (respectivement 185 ha et 508 ha) en espaces bâtis et urbanisés, au cours de la même période.

A la lecture de ces informations factuelles, on peut alors affirmer que l'expansion urbaine est le vrai moteur des changements d'occupation du sol observés dans le BV de Sebkhat Séjoumi. Celle-ci semble se faire sous la pression immense exercée par la poussée démographique très rapide que traverse ce territoire depuis une cinquantaine d'années. Elle-même, conséquence directe de l'exode rural massif qu'a connu la Tunisie, suite notamment à la crise agricole majeur survenue dans ses campagnes ces dernières décennies (ex. avec la progression du chômage, en particulier chez les jeunes, dans les milieux ruraux intérieurs) et la centralisation excessive des services aux citoyens dans quelques centres urbains côtiers. L'autre fait marquant mis en lumière par les cartes est le constat que cette urbanisation rapide se répand essentiellement dans les zones de plaine, où la construction de nouvelles habitations semble relativement facile, y compris là où elles ne devraient tout simplement pas y être (ex. sur des

terrains potentiellement inondables) et, le plus souvent, en l'absence totale de systèmes d'évacuation des excédents d'eau (qu'ils soient liés aux pluies, aux débordements ou aux deux).

Ces nombreux bouleversements paysagers ont donc des conséquences non négligeables sur l'ensemble des éco- et agrosystèmes du BV de Sebkhat Séjoumi (ex. avec la perte nette de leurs superficies), mais également sur les populations humaines qui en bénéficient, même si toutefois, elles en sont aussi à l'origine. Parmi les plus importantes, on cite celles qui découlent de l'imperméabilisation extrême des sols. Résultat, depuis de nombreuses années, les catastrophes liées aux épisodes de crues se sont multipliées dans la région. Cependant, il faut noter que, même si ces phénomènes ont toujours existé (et existeront encore), ce sont les dégâts provoqués par ces derniers qui sont de plus en plus sérieux. En cause notamment, le fait d'avoir laissé se développer des zones d'habitations sur des terrains à fort risque d'inondation, le plus souvent le long des plaines alluviales des principaux cours d'eau, dont certains se trouvent même être partiellement ou totalement obstrués par les déchets solides (en particulier ceux traversant les agglomérations urbaines), ainsi que sur les rives de la sebkha. En outre, par définition, l'imperméabilisation empêche l'excèdent d'eau reçu par le BV de s'infiltrer dans les sols. Elle finit alors sa course directement dans la dépression abritant la sebkha, contribuant ainsi à son engorgement rapide et, dans de rares cas, à la saturation temporaire de sa capacité à l'absorber.

Ceci débouche parfois sur des situations catastrophiques, comme ce fut le cas avec la crue centennale de 2003 (Bergaoui, 2003 ; Chouari, 2013). Entre le 17 et le 24 septembre de cette année, des épisodes de pluies abondantes ont provoqué les inondations les plus étendues jamais enregistrées dans cette région (Chouari, 2013). Conséquences, un bilan tragique avec 4 personnes tuées et plus de 2 500 sinistrés (essentiellement dans le quartier de Sidi Hassine et ses environs), en plus des dégâts matériels considérables (Ennesser et *al*., 2011 ; Noômène, 2014). Cependant, il est important de noter ici que cet évènement serait très probablement beaucoup plus lié à la crue de l'oued Gueriana, de certains de ses affluents ainsi que d'autre oueds du BV, plutôt qu'à un débordement de Sebkhat Séjoumi. En effet, les analyses des images satellites, acquises avant la catastrophe et deux jours seulement après l'épisode pluvieux du 24 septembre, montrent que : i) les zones où l'eau s'est déversée (et où elle stagnait encore au matin du 26 septembre) se trouvent essentiellement le long de ces cours d'eau et ; ii) même si

l'étendue en eau de la sebkha aie atteint une superficie très importante (par rapport à celles observées ces 30 dernières années), celle-ci ne semble pas débordée au-delà des limites géomorphologiques de cette dernière (Figure 28). Ce qui est, pour rappel, tout à fait naturel pour ce type de zones humides méditerranéennes (Pearce et Crivelli, 1994). Le problème viendrait alors davantage d'une mauvaise gestion et/ou d'un manque d'entretien de ces cours d'eau, dont la grande majorité des tronçons traversant les agglomérations urbaines a été chenalisée. Plutôt que de la zone humide elle-même qui, au contraire, devrait être préservée dans un état le plus naturel possible, afin qu'elle puisse jouer pleinement son rôle d'atténuation des effets des crues et des inondations de son bassin versant.

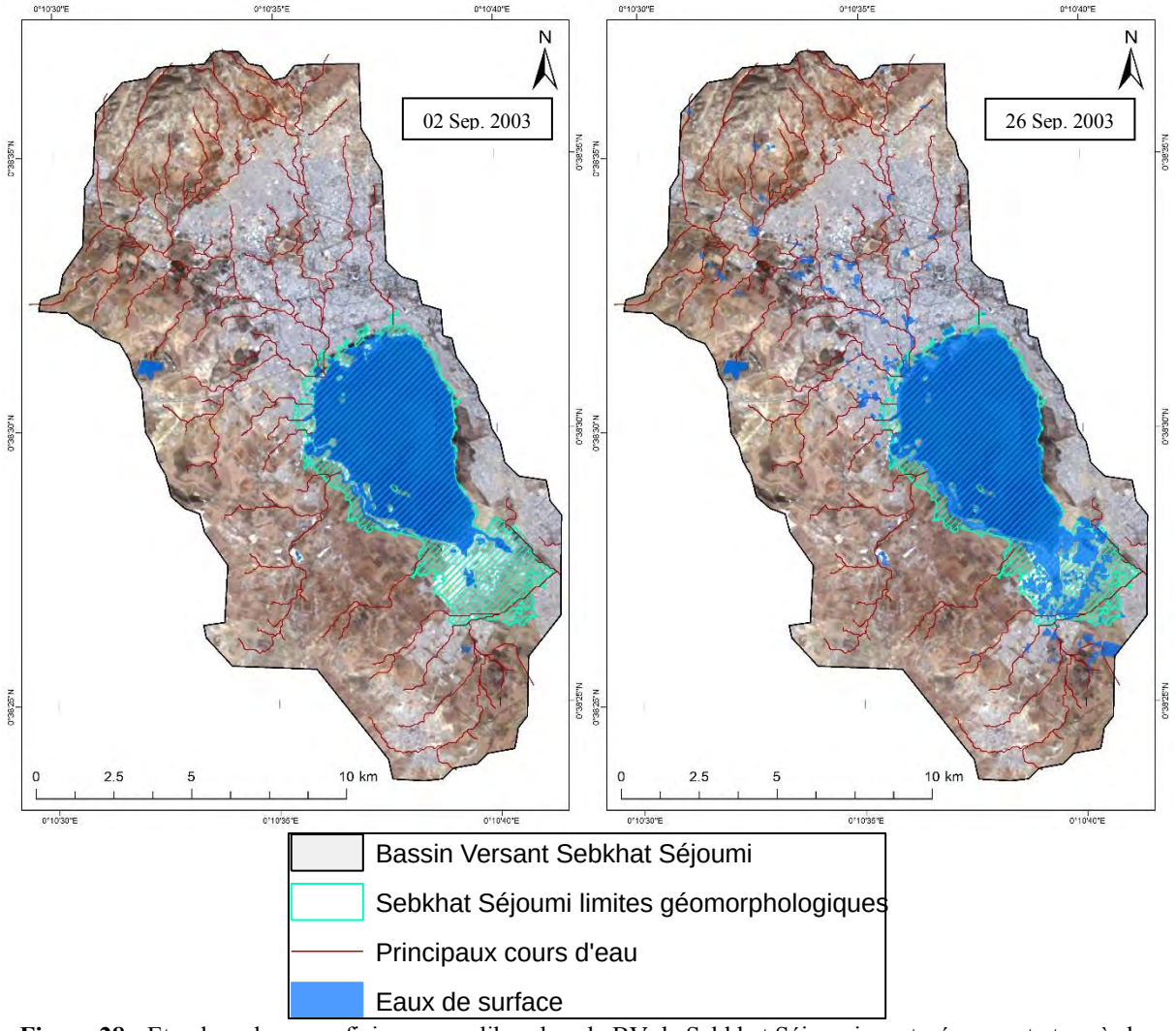


Figure 28 : Etendues des superficies en eau libre dans le BV de Sebkhat Séjoumi, capturées avant et après les épisodes de pluie centennale de septembre 2003 (image de fond Landsat-TM 2003-09-02).

Enfin, en plus des eaux de ruissellement, Sebkhat Séjoumi reçoit des quantités considérables d'eaux usées domestiques et industrielles provenant d'un BV de plus en plus marqué par l'urbanisation et l'implantation anarchique d'industries polluantes. Celles-ci proviennent essentiellement des rives nord et nord-ouest, appartenant aux quartiers de Sidi Hassine, El Madrassa, Hellal et Saïda Manoubia (Chouari, 2013). Conséquences : une eutrophisation accrue de la sebkha, engendrée par les fortes teneurs en nutriments de ces rejets, une contamination microbiologique, chimique et aux métaux lourds de ses eaux et ses sédiments (Marzougui et Ben Mammou, 2006) et une prolifération des moustiques, dont la lutte même pose problème, à cause notamment de l'épandage régulier de produits chimiques très nocifs pour l'Homme et l'environnement.

5. Conclusion générale et recommandations

En conclusion, cette étude a permis de mieux mettre en lumière (et de manière quantifiée) la multitude des bouleversements provoqués par les dynamiques territoriales observées ces trois dernières décennies au sein du bassin versant de Sebkhat Séjoumi. Mais également, les nombreux défis que cela soulève en terme d'aménagement, de conservation et de restauration des milieux naturels et de développement local. En effet, malgré toutes les agressions d'origine anthropique subies par cette zone humide (perte d'habitats naturels, altérations des fonctions écologiques, pollutions, etc.), en plus de celles liées au changement climatique (non traitées ici), elle reste néanmoins dotée d'un potentiel naturel inégalé, grâce notamment à la richesse biologique exceptionnelle qu'elle renferme. Il serait alors biaisé de considérer que tout projet de mise en valeur puisse aboutir, sans pleinement prendre en compte cette composante essentielle, car c'est justement cela qui rend ce site unique dans tout le Maghreb. Bien au contraire, cette richesse devrait être au centre de toutes les décisions à prendre, au même titre que le bien-être humain, pour lequel elle contribue aussi largement.

Bien des initiatives ont été entreprises depuis le début des années 1990 afin de mieux mettre en valeur cet espace. Cependant, il s'agissait le plus souvent de mesures ponctuelles, localisées dans l'espace et limitées le temps. Or le caractère complexe de cette question requière une réponse systémique, incluant la mise en place d'un vrai processus de gestion intégrée à l'échelle de l'ensemble du bassin versant de Sebkhat Séjoumi (Chouari, 2013). A ce titre, voici quelques recommandations et idées d'actions à entreprendre, qui pourront aider à l'enclenchement d'un tel processus :

- Encourager vivement les autorités à stopper impérativement toute progression des constructions sur les rives de la sebkha (notamment nord-ouest, ouest et sud-ouest) ;
- Encourager des initiatives économiques de recyclage et revalorisation de déchets de construction ainsi que les constructions écoresponsables ;
- Mettre en place des systèmes plus efficaces pour l'évacuation des eaux de pluie, en particulier dans les quartiers les plus impactés par les inondations récurrentes ;

- Améliorer le système de pompage automatique des eaux de la sebkha, afin qu'il puisse protéger les riverains contre les inondations, tout en respectant au mieux les cycles naturels de la zone humide ;
- Améliorer les systèmes de collecte des eaux résiduelles dans tous les quartiers riverains de la sebkha et les connectés à des stations d'épuration, afin de les traiter avant de les rejeter dans la zone humide ;
- Promouvoir les pratiques agricoles locales et respectueuses de l'environnement, en valorisant au mieux leurs produits, afin de mettre un frein à la spéculation immobilière sur ces terres ;
- Faire de Sebkhat Séjoumi un pôle d'excellence d'initiatives écologiques et d'économie circulaire afin d'améliorer les conditions de vie des habitants tout en respectant le site naturel et la biodiversité qu'il abrite ;
- Mener des actions de sensibilisation et de plaidoyer auprès des riverains et des décideurs (locaux, mais également nationaux), en faveur de la conservation de Sebkhat Séjoumi ;
- Promouvoir les activités d'écotourisme et de loisir dans la nature (ex. celles basées sur le *birdwatching*), pour générer des revenus aux populations locales, mais aussi mieux sensibiliser les visiteurs à la conservation du site ;
- Mise en place d'un système de suivi écologique de l'écosystème de Sebkhat Séjoumi ;
- Proposition de solutions alternatives et écologiques pour lutter contre les moustiques (ex. les pièges à moustiques) et éviter de polluer davantage les eaux et les sols de la sebkha avec l'épandage de produits chimiques à la toxicité élevée ; et
- Penser un vrai projet d'urbanisation autour de Sebkhat Séjoumi, en concertation avec l'ensemble des acteurs concernés et en mettant la conservation de l'écosystème dans son état naturel au centre, car ce dernier pourrait justement faire partie des solutions.

Bibliographie

Ayache F., Gammar A.M. and Chaouach M., 2006. *Environmental dynamic and conservation of the flamingo in the vicinity of Greater Tunis, Tunisia; the case study of Sebkha Essijoumi*. Earth Surface Processes and Landforms, n°31, pp.1674-1684, Ang.

Barthel P.A., 2006. *Aménager la lagune de Tunis : un modèle d'urbanisme et de développement durable ?* Presses de Sciences Po. 2006/3 n° 39 | pages 129 à 146. ISSN 1278-3986. Article disponible en ligne à l'adresse : https://www.cairn.info/revue-autrepart-2006-3-page-129.htm.

Bergaoui M., 2003. *Pluviométries exceptionnelles enregistrées sur la région du Grand Tunis (journées du 17 et 24 septembre 2003)*. Rapport de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE), Tunis, 6 p.

Bouraoui M. et Donadieu P., 2004. *Pérennité ou disparition des espaces ouverts agricoles dans la planification urbaine ? Les cas du plateau de Saclay, à Paris, et la plaine de Sijoumi, à Tunis*. 40ème congrès ISoCaRP 2004.

Chouari W., 2013. *Problèmes d'environnement liés à l'urbanisation contemporaine dans le système endoréique d'Essijoumi (Tunisie nord-orientale)*. Physio-Géo, Volume 7. URL: http://journals.openedition.org/physio-geo/3493. DOI : 10.4000/physio-geo.3493

Chouari W., 2019. *La perception du risque d'inondation dans les zones inondables du bassin versant de Manouba-Essijoumi (Tunisie Nord-Orientale) : Sensibilité au risque et aux actions de prévention*. BSGLg, 73, 2019, 117-129.

Congalton R., 1994. *Accuracy assessment of remotely sensed data: Future needs and directions*. Proceedings of Pecora. 383-388.

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. Français.

Davranche A., Poulin B. and Lefebvre G., 2013. *Mapping flooding regimes in Camargue wetlands using seasonal multispectral data*. Remote Sensing of Environment 138.165–171.

Elloumi M., 2013. *Trois ans après : retour sur les origines rurales de la révolution tunisienne*. L'Harmattan « Confluences Méditerranée ». 2013/4 N° 87 | pages 193 à 203. ISSN 1148-2664. ISBN 9782343024912. Article disponible en ligne à l'adresse : https://www.cairn.info/revue-confluences-mediterranee-2013-4-page-193.htm.

Ennesser Y., Said V. et Terrier M., 2011. *Évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Tunis*. Rapport final de Phase 1 du Projet « Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières de l'Afrique du Nord ». Egis BCEOM/IAU-IDT/BRGM, 342p. En ligne : http://www.iau-idf.fr/fileadmin/Etudes/etude_823/Tunis_Rapport_Phase_1.pdf.

Gammar A.M. et Chaouech M., 2003. *Dynamique de la végétation et de l'espace sur les rives de la sebkha d'Essijoumi (région de Tunis)*. In : Eau et environnement : Tunisie et milieux méditerranéens, P. ARNOULD et M. HOTYAT édit. Édit. ENS Éditions, Lyon, p. 177-188.

Gao B.G., 1996. *NDWI a Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. Remote Sensing of Environment, 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. 104p.

Harris I., Jones P.D., Osborna T.J. and Listera D.H., 2014. *Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset*. Int. J. Climatol. 34: 623–642. DOI: 10.1002/joc.3711.

Jensen J. R., 2007. *Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective (2nd ed.)*. Prentice Hall, Inc.: Upper Saddle River, NJ., 592 p.

Lefebvre G., Germain C. and Poulin B., 2015. *Contribution of rainfall vs. water management to Mediterranean wetland hydrology: development of an interactive simulation tool to foster adaptation to climate variability*. Environ. Model. Softw. 74 (1), 39–47. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.004.

Lefebvre G., Redmond L., Germain C., Palazzi E., Terzago S., Willm L. and Poulin B., 2019. *Predicting the vulnerability of seasonally-flooded wetlands to climate change across the Mediterranean Basin*. Science of the Total Environment 692 (2019) 546–555.

Lehner B., 2014. *Global watershed boundaries and sub-basin delineations derived from HydroSHEDS data at 15-second resolution*. Technical Documentation Version 1.c. Available online at: http://hydrosheds.org/images/inpages/HydroBASINS_TechDoc_v1c.pdf

Manfreda S., Di Leo M. and Sole A., 2011. *Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models*. Journal of Hydrologic Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367.

Marzougui A. et Ben Mammou A., 2006. *Impacts of the dumping site on the environment: case of the Henchir El Yahoudia site, Tunis, Tunisia*. Géoscience, vol. 338, n° 16, p. 1176-1183.

Mediterranean Wetlands Observatory (MWO), 2012. *Mediterranean Wetlands Outlook*. Tour du Valat. Available online at: https://tourduvalat.centredoc.fr/index.php?lvl=notice_display&id=45145

Mediterranean Wetlands Observatory (MWO), 2014. *Land cover - Spatial dynamics in Mediterranean coastal wetlands from 1975 to 2005*. Thematic collection, issue #2. Tour du Valat, France. 48p. Translated by Charles La Via and Adam Clark. ISBN: 2-910368-60-2.

Mediterranean Wetland Observatory (MWO), 2018. *Mediterranean Wetland Outlook 2: Solutions for sustainable Mediterranean Wetlands*. Tour du Valat. Available online at: https://tourduvalat.org/en/actualites-en/press-releaseextreme-climatic-events-biodiversity-loss-what-if-wetlands-were-part-ofthe-solution/

Ministère de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire (MEHAT), 2017. *Etude de Mise en Valeur et d'Aménagement de la Sebkhat Sijoumi*. Rapport Phase 2 - Activité 3 - Étude d'Impact sur l'Environnement - IHE pour le compte de la DGSAM. 410p.

National Center for Atmospheric Research, 2017. *The Climate Data Guide: CRU TS Gridded precipitation and other meteorological variables since 1901*. Retrieved from https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cru-ts-gridded-precipitation-and-other-meteorological-variables-1901.

Noômène F., 2014. *L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion*. Physio-Géo, Volume 8 | 2014, mis en ligne le 21 March 2014, Consulté le 25 March 2014. URL : http://physiogeo.revues.org/3953. DOI : 10.4000/physio-geo.3953.

Pearce F. et Crivelli A.J., 1994. *Caractéristiques générales des zones humides méditerranéennes*. Tour du Valat, Arles (France), 88p.

Perennou C., Guelmami A., Paganini M., Philipson P. Poulin P., Strauch A., Tøttrup C., Truckenbrodtk J. and Geijzendorffer I.R., 2018. *Mapping Mediterranean Wetlands with Remote Sensing: A Good-Looking Map Is Not Always a Good Map*. Advances in Ecological Research, Volume 58.

Ramsar Sites Information Service, 2016. *FDR pour le Site n° 1712, Sebkhat Séjoumi (Tunisie)*. https://rsis.ramsar.org/ris/1712.

Sayoud M.S., Salhi H., Chalabi B., Allali A., Dakki M., Qninba A., El Agbani M.A., Azafzaf H., Feltrup-Azafzaf C., Dlensi H., Hamouda N., Abdel Latif Ibrahim W., Asran H., Abu Elnoor A., IbrahimH., Etayeb K., Bouras E., Bashaimam W., Berbash A., Deschamps C., Mondain-Monval J.Y., Brochet A.L., Véran S., Defos du Rau P., 2017. *The first coordinated trans-North African mid-winter waterbird census: The contribution of the International Waterbirds Census to the conservation of waterbirds and wetlands at a biogeographical level*. Biological Conservation 206, 11–20.

Skinner J. et Zalewski S., 1995. *Fonctions et valeurs des zones humides méditerranéennes*. Tour du Valat, Arles (France), 80p.

Thomlinson J.R., Bolstad P.V. and Cohen W.B., 1999. *Coordinating methodologies for scaling land cover classifications from site-specific to global: steps toward validating global map products*. Remote Sensing of Environment 70: 16– 28.

Xu H., 2006. *Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 27, No. 14, 3025-3033.

Annexe 1 : Dates d'acquisition des images satellites utilisées

Dates d'acquisition des images satellites (en gris, les séries intra-annuelles utilisées pour les cartographies LULC et SWD à l'échelle du BV)

1987-01-09	1991-07-31	1997-02-21	2000-12-14	2005-03-15	2009-03-02	2013-03-29	2017-08-23
1987-02-10	1991-08-16	1997-04-26	2001-02-08	2005-03-23	2009-03-26	2013-04-03	2017-10-10
1987-05-17	1991-10-03	1997-05-28	2001-03-04	2005-05-02	2009-05-21	2013-05-24	2017-12-29
1987-06-02	1991-11-04	1997-06-13	2001-03-28	2005-05-26	2009-06-06	2013-06-09	2018-01-16
1987-07-04	1992-01-23	1997-07-15	2001-05-31	2005-06-11	2009-06-14	2013-06-25	2018-02-28
1987-07-20	1992-04-28	1997-08-16	2001-06-08	2005-06-19	2009-06-30	2013-07-11	2018-03-10
1987-08-21	1992-05-14	1997-09-01	2001-06-16	2005-06-27	2009-07-16	2013-07-27	2018-04-29
1987-09-22	1992-05-22	1997-10-03	2001-06-24	2005-07-13	2009-07-24	2013-08-12	2018-05-24
1987-10-08	1992-05-30	1997-10-19	2001-07-02	2005-08-14	2009-08-01	2013-08-28	2018-06-23
1987-10-24	1992-06-15	1997-12-22	2001-07-18	2005-09-23	2009-08-09	2013-10-31	2018-07-18
1987-11-25	1992-07-17	1998-02-08	2001-07-26	2005-11-10	2009-09-02	2014-02-04	2018-08-14
1988-01-04	1992-08-02	1998-03-28	2001-08-03	2005-12-04	2009-09-18	2014-04-09	2018-09-01
1988-02-29	1992-08-18	1998-04-29	2001-08-27	2006-03-26	2009-10-20	2014-05-11	2018-10-26
1988-06-20	1992-09-19	1998-05-15	2001-09-04	2006-06-30	2009-10-28	2014-06-12	2018-11-20
1988-08-07	1992-10-05	1998-05-31	2001-09-28	2006-07-08	2009-11-13	2014-06-28	2018-12-27
1988-09-24	1992-10-21	1998-07-02	2001-10-06	2006-07-24	2009-12-07	2014-07-30	
1988-10-10	1992-11-22	1998-07-17	2001-10-22	2006-09-18	2009-12-31	2014-08-15	
1988-10-26	1993-01-25	1998-08-03	2001-11-15	2006-12-15	2010-01-24	2014-09-16	
1988-11-11	1993-02-26	1998-08-19	2002-01-10	2006-12-31	2010-02-25	2014-10-18	
1988-12-13	1993-06-02	1998-09-04	2002-02-11	2007-01-08	2010-03-29	2014-11-03	
1989-01-30	1993-07-04	1998-11-23	2002-02-27	2007-02-17	2010-06-01	2014-11-19	
1989-03-03	1993-07-20	1998-12-09	2002-03-15	2007-02-25	2010-06-17	2014-12-05	
1989-04-04	1993-08-05	1999-03-31	2002-04-08	2007-04-06	2010-07-19	2015-01-06	
1989-04-20	1993-08-21	1999-06-03	2002-05-26	2007-04-22	2010-08-04	2015-02-07	
1989-06-07	1993-09-06	1999-06-19	2002-06-03	2007-05-24	2010-09-05	2015-02-23	
1989-06-23	1993-11-09	1999-07-05	2002-06-11	2007-06-25	2010-10-07	2015-05-14	
1989-07-25	1993-12-27	1999-07-29	2002-06-19	2007-07-03	2010-10-23	2015-06-15	
1989-08-10	1994-04-18	1999-08-06	2002-06-27	2007-07-11	2011-01-03	2015-07-01	
1989-08-26	1994-05-04	1999-08-14	2002-07-05	2007-07-19	2011-01-11	2015-07-17	
1989-10-29	1994-05-20	1999-08-30	2002-07-21	2007-07-27	2011-02-12	2015-08-18	
1989-11-14	1994-06-05	1999-09-15	2002-08-06	2007-08-04	2011-02-20	2015-09-03	
1989-11-30	1994-06-21	1999-09-23	2003-05-05	2007-08-12	2011-04-09	2015-12-08	
1989-12-16	1994-07-07	1999-10-25	2003-07-16	2007-08-28	2011-06-20	2015-12-24	
1990-01-17	1994-08-24	1999-11-02	2003-08-17	2007-09-13	2011-07-30	2016-01-25	
1990-02-18	1994-09-25	1999-11-26	2003-09-02	2007-11-24	2011-08-07	2016-03-29	
1990-03-22	1994-10-27	1999-12-04	2003-09-26	2008-01-11	2011-08-15	2016-04-14	
1990-04-23	1995-02-16	2000-01-05	2003-10-12	2008-01-27	2011-08-31	2016-04-30	
1990-05-25	1995-03-20	2000-01-21	2003-10-20	2008-02-12	2011-09-16	2016-05-16	
1990-06-10	1995-05-23	2000-03-01	2004-01-08	2008-02-28	2011-10-02	2016-07-03	
1990-06-26	1995-06-24	2000-04-26	2004-01-16	2008-03-15	2011-10-18	2016-07-19	
1990-07-28	1996-02-03	2000-05-04	2004-02-01	2008-03-23	2011-12-05	2016-08-04	
1990-08-13	1996-02-19	2000-06-05	2004-03-12	2008-06-11	2012-01-06	2016-08-20	
1990-09-14	1996-03-06	2000-06-21	2004-05-15	2008-07-05	2012-03-26	2016-10-23	
1990-09-30	1996-03-22	2000-06-29	2004-05-31	2008-07-21	2012-04-27	2016-12-10	
1990-11-01	1996-05-25	2000-07-07	2004-06-08	2008-07-29	2012-05-13	2017-02-12	
1990-12-19	1996-06-10	2000-07-31	2004-06-24	2008-08-06	2012-05-29	2017-02-28	
1991-01-04	1996-07-28	2000-08-08	2004-07-18	2008-08-14	2012-06-30	2017-04-01	
1991-03-25	1996-08-13	2000-08-16	2004-08-11	2008-08-22	2012-07-16	2017-05-03	
1991-04-26	1996-09-30	2000-08-24	2004-09-04	2008-08-30	2012-08-01	2017-05-19	
1991-05-12	1996-11-01	2000-09-01	2004-09-12	2008-11-02	2012-08-17	2017-06-04	
1991-05-28	1996-12-03	2000-09-17	2004-09-28	2008-11-10	2012-10-04	2017-06-20	
1991-06-13	1996-12-19	2000-10-11	2005-01-02	2008-12-28	2012-11-05	2017-07-06	
1991-06-29	1997-02-05	2000-11-20	2005-01-10	2009-02-22	2012-12-23	2017-08-07	

Annexe 2 : Nomenclature hybride CORINE Land Cover / Ramsar

Code CLC	Niveau	Description CLC (modifiée)
1	**Territoires artificialisés**	Surfaces artificielles
11	Territoires artificialisés	Zones urbanisées
111	Territoires artificialisés	Tissu urbain continu
112	Territoires artificialisés	Tissu urbain discontinu
12	Territoires artificialisés	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication
121	Territoires artificialisés	Zones industrielles et commerciales
122	Territoires artificialisés	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
123	Territoires artificialisés	Zones portuaires
124	Territoires artificialisés	Aéroports
13	Territoires artificialisés	Mines, décharges et chantiers
131	Territoires artificialisés	Extraction de matériaux
1311	Territoires artificialisés	Excavations ; gravières/ballastières/glaisières ; sablières, puits de mine
132	Territoires artificialisés	Décharges
133	Territoires artificialisés	Chantiers
14	Territoires artificialisés	Espaces verts artificialisés, non agricoles
141	Territoires artificialisés	Espaces verts urbains
142	Territoires artificialisés	Équipements sportifs et de loisirs
2	**Territoires agricoles**	Territoires agricoles
21	Territoires agricoles	Terres arables
211	Territoires agricoles	Terres arables hors périmètres d'irrigation
212	Territoires agricoles	Périmètres irrigués en permanence
213	Territoires agricoles	Rizières
22	Territoires agricoles	Cultures permanentes
221	Territoires agricoles	Vignobles
222	Territoires agricoles	Vergers et petits fruits
223	Territoires agricoles	Oliveraies
23	Territoires agricoles	Prairies
231	Territoires agricoles	Prairies
2313	Territoires agricoles	Prairies humides
24	Territoires agricoles	Zones agricoles hétérogènes
241	Territoires agricoles	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
242	Territoires agricoles	Systèmes culturaux et parcellaires complexes
243	Territoires agricoles	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
244	Territoires agricoles	Territoires agro-forestiers
3	**Forêts et milieux semi-naturels**	Forêts et milieux semi-naturels
31	Forêts et milieux semi-naturels	Forêts
311	Forêts et milieux semi-naturels	Forêts de feuillus
3112	Forêts et milieux semi-naturels	Forêts humides dont ripisylve
312	Forêts et milieux semi-naturels	Forêts de conifères
313	Forêts et milieux semi-naturels	Forêts mélangées
32	Forêts et milieux semi-naturels	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
321	Forêts et milieux semi-naturels	Pelouses et pâturages naturels
322	Forêts et milieux semi-naturels	Landes et broussailles
323	Forêts et milieux semi-naturels	Végétation sclérophylle
324	Forêts et milieux semi-naturels	Forêt et végétation arbustive en mutation
3241	Forêts et milieux semi-naturels	Zones humides dominées par des buissons ; marécages à buissons, marécages d'eau douce dominés par des buissons, saulaies, aulnaies ; sur sols inorganiques
33	Forêts et milieux semi-naturels	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation
331	Forêts et milieux semi-naturels	Plages, dunes et sable
3311	Forêts et milieux semi-naturels	Rivages de sable fin, grossier ou de galets ; y compris bancs et langues de sable, îlots sableux, systèmes dunaires et dépressions intra-dunales humides
332	Forêts et milieux semi-naturels	Roches nues
3321	Forêts et milieux semi-naturels	Rivages marins rocheux ; y compris îles rocheuses, falaises marines
333	Forêts et milieux semi-naturels	Végétation clairsemée
334	Forêts et milieux semi-naturels	Zones incendiées
335	Forêts et milieux semi-naturels	Glaciers et neiges éternelles
4	**Zones humides**	Zones humides
41	Zones humides	Zones humides intérieures
411	Zones humides	Marais intérieurs
4111	Zones humides	Roselières et hauts hélophytes
4114	Zones humides	Mares/marais salins/saumâtres/alcalins permanents
4115	Zones humides	Mares/marais salins/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents
4116	Zones humides	Mares/marais d'eau douce permanents; étangs (moins de 8 hectares), marais et marécages sur sols inorganiques; avec végétation émergente détrempée durant la majeure partie de la saison de croissance au moins
4117	Zones humides	Mares/marais d'eau douce saisonniers/intermittents sur sols inorganiques; y compris fondrières, marmites torrentielles, prairies inondées de manière saisonnière, marais alaîches
4118	Zones humides	Zones humides de toundra; y compris mares de la toundra, eaux temporaires de la fonte des neiges
4119	Zones humides	Sources d'eau douce; oasis
412	Zones humides	Tourbières
4121	Zones humides	Tourbières hautes actives
4122	Zones humides	Tourbières de couverture
4123	Zones humides	Tourbières boisées; forêts marécageuses sur tourbière.
42	Zones humides	Zones humides maritimes
421	Zones humides	Marais maritimes

422	Zones humides	Marais salants
423	Zones humides	Zones intertidales
4231	Zones humides	Marais intertidaux; y compris prés salés, schorres, marais salés levés, marais cotidaux saumâtres et d'eau douce
4232	Zones humides	Zones humides boisées intertidales; y compris marécages à mangroves, marécages à palmiers nipa et forêts marécageuses cotidales d'eau douce
5	**Surfaces en eau**	Surfaces en eau
51	Surfaces en eau	Eaux continentales
511	Surfaces en eau	Cours d'eau et voies d'eau
5111	Surfaces en eau	Deltas intérieurs permanents
5112	Surfaces en eau	Rivières/cours d'eau/ruisseaux permanents; y compris cascades
5113	Surfaces en eau	Rivières/cours d'eau/ruisseaux saisonniers/intermittents/irréguliers
5114	Surfaces en eau	Canaux et fossés de drainage, rigoles
512	Surfaces en eau	Plans d'eau
5121	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce permanents (plus de 8 hectares); y compris grands lacs de méandres
5122	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce saisonniers/intermittents (plus de 8 hectares); y compris lacs des plaines d'inondation)
5123	Surfaces en eau	Lacs salés/saumâtres/alcalins permanents
5124	Surfaces en eau	Lacs salés et étendues/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents
5125	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce permanents (plus de 8 hectares); avec végétation benthique; y compris grands lacs de méandres avec végétation benthique
5126	Surfaces en eau	Lacs d'eau douce saisonniers/intermittents (plus de 8 hectares); avec végétation benthique;; y compris lacs des plaines d'inondation avec végétation benthique
5127	Surfaces en eau	Lacs salés/saumâtres/alcalins permanents avec végétation benthique
5128	Surfaces en eau	Lacs salés et étendues/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents avec végétation benthique
5129	Surfaces en eau	Étangs d'aquaculture (par ex. poissons, crevettes)
5130	Surfaces en eau	Étangs; y compris étangs agricoles, étangs pour le bétail, petits réservoirs; (généralement moins de 8 hectares)
5131	Surfaces en eau	Zones de stockage de l'eau; réservoirs/barrages/retenues de barrages/retenues d'eau; (généralement plus de 8 hectares)
5132	Surfaces en eau	Sites de traitement des eaux usées; y compris champs d'épandage, étangs de sédimentation, bassins d'oxydation
52	Surfaces en eau	Eaux maritimes
521	Surfaces en eau	Lagunes littorales
5211	Surfaces en eau	Lagunes côtières saumâtres/salées; y compris lagunes saumâtres à salées reliées à la mer par un chenal relativement étroit au moins
5212	Surfaces en eau	Lagunes côtières d'eau douce; y compris lagunes deltaïques d'eau douce
522	Surfaces en eau	Estuaire
523	Surfaces en eau	Mers et océans
5231	Surfaces en eau	Eaux marines peu profondes et permanentes, dans la plupart des cas d'une profondeur inférieure à six mètres à marée basse; y compris baies marines et détroits
5232	Surfaces en eau	Lits marins aquatiques sub-tidaux; y compris lits de varech, herbiers marins, prairies marines tropicales
5233	Surfaces en eau	Récifs coralliens

Annexe 3 : Matrices de validation des résultats LULC 2010 et 2018

LACO-Wiki Validation Report Sebkhat Sejoumi catchment area LULC map 2010 (derived from Landsat TM 30m annual time series)

		User Interpretations																												
		2	11	31	32	33	121	122	131	132	133	141	142	244	511	1311	2313	3112	3311	4111	4115	5114	5123	5124	5127	5130	5131	5132	Row Total	User Accuracy
Dataset	2	84	0	0	0	6	1	2	1	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	84%
	11	8	86	1	0	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	86%
	31	2	0	4	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	40%
	32	1	0	0	25	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	89%
	33	1	0	0	3	15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	75%
	121	2	3	0	0	1	40	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	80%
	122	1	1	1	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	93%
	131	2	0	0	0	1	0	0	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	69%
	132	1	0	0	0	0	1	0	0	25	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	30	83%
	133	1	0	0	0	1	0	0	0	0	12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	80%
	141	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	85%
	142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	100%
	244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	100%
	511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	100%
	1311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	70%
	2313	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	90%
	3112	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	60%
	3311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	1	0	1	0	0	0	0	0	17	88%
	4111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	10	90%
	4115	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	30	87%
	5114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15	100%
	5123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	4	100%
	5124	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	6	83%
	5127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	10	100%
	5130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	100%
	5131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	100%
	5132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	100%
	Column Total	106	90	9	30	28	44	42	10	32	15	23	14	2	3	7	14	12	15	9	28	15	5	5	10	1	1	1	571	
	Producer Accuracy	79%	96%	44%	83%	54%	91%	88%	90%	78%	80%	74%	71%	100%	100%	100%	64%	75%	100%	100%	93%	100%	80%	100%	100%	100%	100%	100%		
	Portmanteau Accuracy	93%	97%	98%	99%	97%	98%	99%	99%	98%	99%	98%	99%	100%	100%	99%	99%	98%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		

Overall Accuracy	**84%**
Kappa	**0.83**

Dataset \ User Interpretations	2	11	31	32	33	121	122	131	132	133	141	142	231	244	511	1311	2313	3112	3311	4111	4115	5114	5123	5124	5127	5130	5131	5132	Row Total	User Accuracy
2	85	2	0	1	0	1	0	0	2	3	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	85%
11	10	80	0	0	1	3	2	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	80%
31	1	0	8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	80%
32	1	0	0	25	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	83%
33	1	0	0	0	18	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	90%
121	0	3	0	1	1	41	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	82%
122	3	1	0	0	0	3	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	83%
131	1	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	95%
132	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	100%
133	0	0	0	0	0	1	0	0	1	27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	90%
141	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	95%
142	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	90%
231	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	100%
511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	100%
1311	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	70%
2313	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	100%
3112	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	80%
3311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	20	95%
4111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	1	0	0	0	10	90%
4115	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	23	0	0	2	0	0	0	30	77%
5114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5	100%
5123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	100%
5124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	7	100%
5127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	8	0	0	10	80%
5130	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5	100%
5131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	100%
5132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	100%
Column Total	104	86	9	28	24	50	36	20	43	30	21	9	7	2	5	7	10	8	20	12	24	5	5	10	9	5	1	3	593	
Producer Accuracy	82%	93%	89%	89%	75%	82%	92%	95%	70%	90%	90%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	75%	96%	100%	100%	70%	89%	100%	100%	100%		
Portmanteau Accuracy	94%	96%	99%	99%	99%	97%	98%	100%	98%	99%	99%	100%	99%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	99%	99%	100%	100%	99%	99%	100%	100%	100%		

Overall Accuracy	**86%**
Kappa	**0.85**

Annexe 4 : Caractérisation des enjeux socio-économiques face aux risques de crue et d'inondation

La méthodologie employée suit les trois étapes suivantes :

a) La méthode basée sur le MNT a permis de représenter l'ensemble du territoire en 5 classes, en fonction du risque lié aux crues et aux débordement des eaux de surface (Manfreda et *al*., 2011) :

- Classe 0 : Risque Très Faible
- Classe 1 : Risque Faible
- Classe 2 : Risque Modéré
- Classe 3 : Risque Fort
- Classe 4 : Risque Très Fort

Le résultat est un raster ayant la même résolution spatiale que le MNT SRTM 1 arc-s Global DEM en entrée (~25m).

b) Par la suite, chaque classe identifiée dans chacune des cartes LULC est notée (à dire d'expert) selon son degré de vulnérabilité face aux risques de crue et d'inondation (0 : pas du tout vulnérable à ; 3 : très vulnérable) :

Code Classe LULC	Degré de vulnérabilité face aux risques d'inondation
2	1
11	3
31	0
32	0
33	0
121	2
122	2
131	1
132	1
133	1
141	1
142	2
231	1
244	1
511	0
1311	0
2313	0
3112	0
3311	0
4111	0
4115	0
5114	0
5123	0
5124	0
5127	0
5130	0
5131	0
5132	1

Les résultats sont des rasters avec les valeurs de vulnérabilité attribuées à chaque cellule et dont les résolutions spatiales correspondent à celles des images satellites en entrée (20m pour Sentinel-2 et 30m pour les séries Landsat).

c) Enfin, en multipliant (pixel à pixel) les valeurs des rasters produits dans l'étapes **b)**, avec celles du raster produit à l'étape **a)**, on obtient des cartes représentant les principaux enjeux socio-économiques face aux risques de crue et d'inondation pour chaque hydropériode annuelle (0 : enjeux très faibles ; à 12 : enjeux très forts).