

SUIVI ET QUANTIFICATION DE L'URBANISATION INCONTRÔLÉE : UNE APPROCHE BASÉE SUR L'ANALYSE MULTITEMPORELLE DES IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT ; CAS DE LA VILLE DE BOU-SAÂDA (ALGÉRIE)

DECHAICHA Assoule^{1*}, ALKAMA Djamel²

¹ Département d'Architecture, Université 8 mai 1945 - Guelma. BP 401, 24000

Guelma. Algérie. Tel : 213 (0) 37 10 05 53 – Fax : +213 (0) 37 10 05 55. E-mail : dechaicha.assoul@univ-guelma.dz

² Département d'Architecture, Université 8 mai 1945 - Guelma. BP 401, 24000

Guelma. Algérie. Tel : 213 (0) 37 10 05 53 – Fax : +213 (0) 37 10 05 55. E-mail : alkama.djamel@univ-guelma.dz

Résumé

L'urbanisation incontrôlée est actuellement considérée comme l'un des défis majeurs que rencontrent les villes algériennes, compte tenu des effets néfastes sur l'environnement et des problèmes engendrés par cette modalité de croissance spatiale. Les espaces agricoles et naturels se trouvent en péril face à l'avancée excessive des surfaces bâties. La mise en œuvre d'un développement urbain durable nécessite une connaissance effective de l'état d'occupation et d'utilisation du sol. Avec les procédures technico-administratives actuelles de planification urbaine, les responsables locaux ne disposent pas d'outils efficaces permettant l'actualisation permanente des données spatiales qui rendraient possible une meilleure gestion de l'étalement rapide des zones urbanisées. Un suivi régulier de l'évolution des extensions urbaines nécessite le recours aux outils techniques et méthodologiques offerts par la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG). La présente étude consiste à mettre en évidence le processus de croissance spatiale caractérisant la ville de Bou-Saâda (Algérie) au cours de la période 1984 – 2020. La méthodologie suivie est basée sur l'analyse multitemporelle des images satellitaires Landsat et l'application de la détection du changement d'utilisation et d'occupation du sol pour la cartographie et la quantification des différentes formes d'urbanisation. Les résultats de la comparaison post-classification des images satellitaires des années 1984, 1996, 2008 et 2020 ont révélé deux tendances spatiotemporelles nettement opposées : un important étalement spatial des surfaces bâties, contre une perte progressive de la palmeraie. Pendant la même période, la tache urbaine a enregistré un gain de surface estimé à plus de 470 ha, tandis que la palmeraie a perdu près de 47 ha. La lecture diachronique des cartes obtenues a permis de distinguer trois formes de croissance spatiale : des extensions en continu avec le tissu existant caractérisent la première période (1984 – 1996) ; un passage du mode continu vers un mode éclaté, après apparition de la nouvelle ville et des quartiers périphériques spontanés s'est manifesté au cours de la seconde période (1996 – 2008) ; un mode de densification des nouvelles zones urbaines domine la dernière période (2008 – 2020). La cartographie du changement d'occupation et d'utilisation du sol a permis l'identification des surfaces agricoles converties en surfaces bâties, et la mise en valeur de l'impact négatif de l'urbanisation incontrôlée sur la palmeraie. La quantification de ces transformations spatiales a montré que près de 40 % de la palmeraie est convertie, soit en surfaces bâties, soit en sols nus. Le suivi de l'évolution des classes d'occupation du sol a également révélé une variation de rythmes d'évolution spatiale. Ces rythmes étaient plus accélérés pendant la dernière période (2008 – 2020), aussi bien pour les surfaces urbanisées, dans un sens croissant, que pour la palmeraie, dans un sens décroissant. Cette étude montre ainsi l'importance de la télédétection spatiale et des SIG comme moyens efficaces permettant le suivi et la compréhension de la croissance des villes et des transformations spatiales accompagnantes.

Mots clé : Urbanisation incontrôlée, détection du changement, images satellitaires Landsat, SIG, cartographie, palmeraie.

Abstract

Uncontrolled urbanisation is currently seen as one of the major challenges facing Algerian cities given the negative effects on the environment and the problems caused by this uncontrolled modality of spatial growth. Faced with excessive development of built-up areas, agricultural and natural areas are in a perilous situation. Implementing sustainable urban development requires effective knowledge of the state of land use and land cover. With the current technical and administrative procedures for urban planning, local officials do not have effective tools that allow them a continuous spatial data update to better manage the rapid sprawl of urbanised areas. Regularly monitoring the evolution of urban sprawl requires the use of remote sensing and geographic information system (GIS) tools. The present study aims to highlight the spatial growth process characterising the town of Bou-Saada (Algeria) from 1984 to 2020. The methodological approach is based on a multitemporal analysis of Landsat satellite images and the application of a land use and land cover change detection technique to map and quantify different urbanisation patterns. The results of the post-classification comparison of satellite images for the years 1984, 1996, 2008 and 2020 revealed two distinctly opposed spatiotemporal trends: a significant spatial growth of built-up areas and the progressive loss of palm groves. In the same period, urban patches

made an estimated surface gain of over 470 ha, while palm groves lost nearly 47 ha. The diachronic reading of the obtained maps made it possible to distinguish three forms of spatial growth: continuous expansions with the existing urban fabric characterising the first period (1984–1996), a shift from a continuous mode to a fragmented mode after emergence of the new town and spontaneous peripheral neighbourhoods during the second period (1996–2008) and a densification mode of new urban areas dominating the last period (2008–2020). The land use and land cover change cartography allowed for the identification of agricultural areas that had been converted into built-up areas, as well as the highlighting of the negative impact of uncontrolled urbanisation on palm groves. Quantifying these spatial transformations demonstrated that nearly 40% of palm groves had either been converted into built-up areas or reduced to bare soil. Monitoring the land use classes' evolution also revealed a variation in spatial evolution rates. These evolution rates were more accelerated during the last period (2008–2020), both for urbanised areas in an increasing direction and for palm groves in a decreasing direction. This study thus illustrates the importance of remote sensing and GIS tools for monitoring and understanding the growth of cities and their accompanying spatial transformations.

Keywords: *Uncontrolled urbanisation, change detection, Landsat satellite images, GIS, cartography, palm groves*

1. Introduction

L'urbanisation incontrôlée constitue actuellement un des problèmes majeurs que connaissent les villes algériennes depuis l'indépendance. Les villes oasiennes n'ont pas échappé de ce phénomène universel, mais de manière plus marquée par rapport au nord du pays (Côte, 1998 ; Kouzmine et Fontaine, 2018). Les surfaces bâties sont en perpétuel étalement, au détriment des zones de potentialité agricole et naturelle (CNES, 2002 ; Sidi Boumedine, 2013). Les conséquences sont notablement néfastes, autant sur le plan environnemental que socioéconomique. À une échelle locale, il a été constaté que cette modalité non maîtrisée de croissance spatiale est consommatrice d'espaces, et génératrice de déséquilibres et de dysfonctionnements des écosystèmes. À un niveau global, la croissance des villes est considérée comme étant le principal responsable d'aggravation des problèmes environnementaux que rencontre notre biosphère, comme ceux de la pollution, de l'effet de serre, du changement climatique, de la dégradation de la biodiversité et des ressources naturelles, ainsi que ses problèmes sociaux liés à la ségrégation sociale (IPCC, 2014).

L'engagement de la communauté internationale pour la réduction de l'empreinte écologique du développement urbain, dans une perspective généralisée de développement durable, a poussé les aménageurs et les urbanistes à rechercher les meilleures alternatives afin de favoriser la protection de l'environnement et des ressources naturelles (Allain, 2004). La connaissance actualisée de l'état effectif de l'occupation du sol constitue donc une étape clé dans toute démarche de durabilité urbaine (Aguéjdad et Hubert-Moy, 2016). Cependant, les autorités locales ne disposent pas d'outils appropriés pour maîtriser et gérer l'étalement rapide et incontrôlé des surfaces urbanisées. Les documents d'aménagement et d'urbanisme, dont l'élaboration repose encore sur des méthodes

traditionnelles, ne sont pas en mesure d'être actualisés en adéquation avec le rythme accéléré de l'évolution des villes algériennes (Sidi Boumedine, 2013).

Le recours à la télédétection spatiale et aux systèmes d'information géographique (SIG) permet de surmonter ces difficultés grâce aux approches de suivi multitemporel des changements affectant les surfaces terrestres. La détection du changement est l'une des innovations principales apportées par cette nouvelle technologie. Celle-ci revêt un intérêt toujours plus important, notamment pour l'étude des dynamiques de croissance des territoires urbanisés. Cette approche est basée sur l'exploitation des images satellitaires qui offrent des vues synoptiques sur les territoires étudiés avec temporalité régulière, ce qui permet l'actualisation de l'information spatiale avec moins d'investissements en matière de temps et de coût économique (Gamba et Dell'Acqua, 2016). Les images satellitaires sont devenues un support incontournable d'information pour le suivi et le contrôle de l'urbanisation accélérée, particulièrement dans les pays du Sud où ces dynamiques spatiales sont plus accentuées et semblent moins estimées (Armand, 2016).

La présente étude vise principalement à mettre en évidence le processus d'étalement spatial caractérisant la ville de Bou-Saâda en Algérie pendant la période allant de 1984 à 2000, à travers l'établissement d'une cartographie et d'une quantification du changement spatiotemporel. La méthodologie suivie est basée sur la mobilisation des images Landsat et l'application de la détection du changement. Cette étude est organisée en quatre sections. La première section est consacrée au cadrage de quelques éléments théoriques liés à la détection du changement. L'aire d'étude et la méthodologie suivie sont présentées dans la seconde section. Les résultats obtenus et leur interprétation sont par la suite exposés dans la troisième section. Enfin, des éléments de conclusion viendront clore l'étude.

1.1. La détection du changement comme outil de suivi de l'urbanisation incontrôlée

La détection du changement est l'une des principales applications de la télédétection spatiale (Mas, 2000). Elle correspond à une procédure de comparaison de scènes satellitaires multidates, dont la finalité est l'identification du changement biophysique de la couverture du sol pendant une période donnée. Le changement ici peut être mis en valeur à travers le calcul de la variation de la radiance des mêmes pixels, mesurée à deux temps différents (Mas, 2000 ; Singh, 1989). Les méthodes de détection du changement sont principalement basées sur la combinaison de la télédétection spatiale et des

Plusieurs méthodes de détection du changement sont mises en œuvre. D'une manière globale, ces méthodes peuvent être regroupées en trois grandes catégories, selon l'approche suivie et l'objectif de l'étude : (i) des méthodes préclassificatoires ou de comparaison directe, basées sur la mesure du changement radiométrique (des méthodes algébriques) ; (ii) des méthodes de comparaison des images améliorées après normalisation et rehaussement ; (iii) des méthodes de comparaison post-classification basées sur la comparaison des cartes thématiques découlant de la classification des images satellitaires multidates préclassificatoires. La qualité des

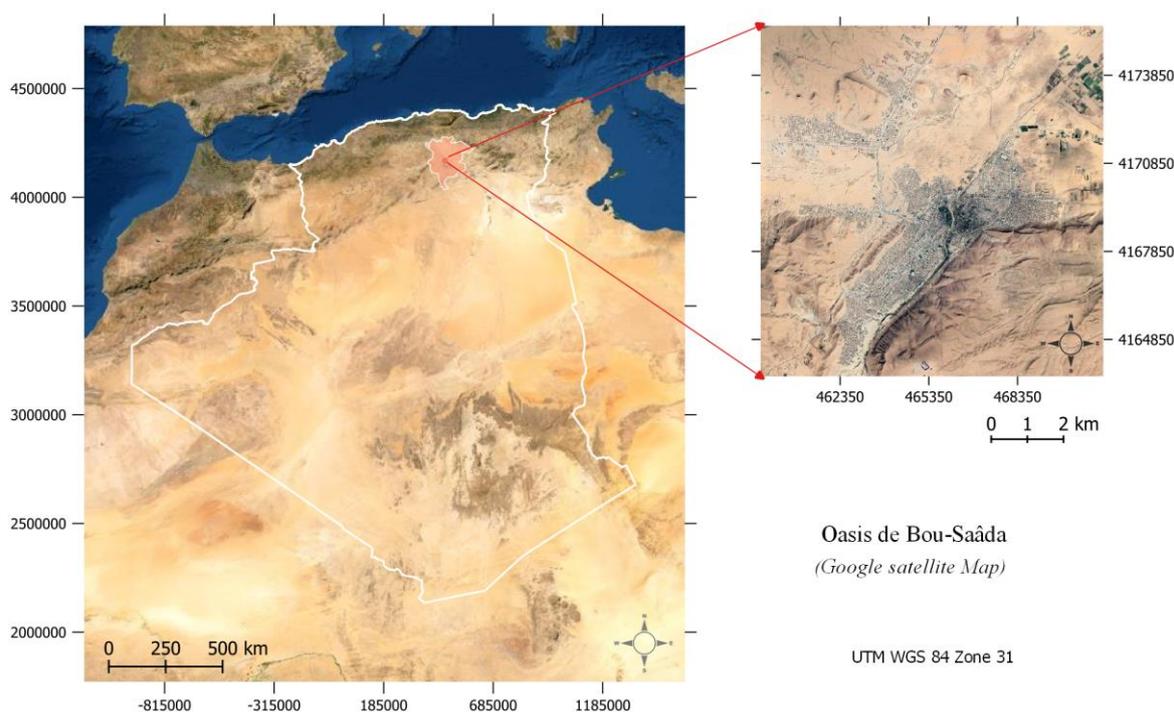


Figure 1 : Situation de l'aire d'étude
(Cartes établies par les auteurs à partir d'une imagerie Google Satellite, 2020)

SIG, aussi bien pour l'acquisition, le traitement et l'analyse des images satellitaires. L'évolution spatiale des villes peut être appréhendée et quantifiée en ayant recours à la détection du changement, qui permet d'identifier les surfaces affectées par l'urbanisation. La finalité de cette démarche peut inclure la localisation du changement, la définition du type de changement ainsi que sa description quantitative (Gamba et Dell'Acqua, 2016). Dans une optique de durabilité urbaine, la détection du changement peut servir comme un outil d'aide à l'évaluation et à la prise de meilleures décisions en matière de protection de l'environnement et de gestion des ressources naturelles (Agejdad et Hubert-Moy, 2016 ; Dechaïcha et Alkama, 2020 ; Dechaïcha et Alkama, 2020).

résultats dépend directement de l'échelle d'étude et de la qualité des images. Le choix de la méthode est généralement conditionné par les objectifs recherchés, le niveau d'hétérogénéité spatiale du territoire étudié, les résolutions spatiales et spectrales des images utilisées et les connaissances de l'analyste (D Lu et al., 2004 ; Mas, 2000).

2. Matériel et méthodes

2.1. Aire d'étude

La ville de Bou-Saâda, chef-lieu de daïra appartenant à la wilaya de M'sila, est située à 245 km au sud-est de la capitale Alger, à 35°13' de latitude nord, 04°10' de longitude est, et sur une altitude variant de 530 m à 650 m (figure 1). Une oasis ancestrale implantée aux piémonts des Ouled-Nail de l'Atlas saharien, sur un site accidenté constituant la lisière sud de la dépression du

chott El-Hodna. Topographiquement, la ville actuelle est enserrée entre deux chaînes de montagnes : Djebel Kerdada à l'est, et Djebel Azzedine à l'ouest et au sud-ouest. Compte tenu de cette configuration, les extensions actuelles s'opèrent principalement au nord et au nord-est de la ville. La ville de Bou-Saâda est caractérisée par un climat continental semi-aride avec des hivers doux et froids et des étés secs et très chauds. Les températures annuelles varient entre un minimum de 4.9 °C au mois de janvier et un maximum de 40.3 °C au mois de juillet. L'humidité relative varie entre 26 % au mois de juillet et 68 % au mois de janvier. Les précipitations sont rares et irrégulières, avec un cumul annuel de l'ordre de 151.1 mm. Les vents dominants sont majoritairement de deux directions : des vents froids nord et nord-est soufflent pendant la saison hivernale, et des vents chauds et assez secs (le sirocco), souvent porteurs de sable, provenant du sud et du sud-ouest, caractérisent la saison estivale.

Par sa position géographique de carrefour, située sur la croisée de trois axes nationaux (la RN° 08 allant vers Alger, la RN° 46 allant vers Biskra au sud-est, et la RN° 89 allant vers Djelfa au sud-ouest), la ville de Bou-Saâda constitue un pôle attractif influençant pratiquement l'ensemble des 23 communes de la région sud de la wilaya de M'sila (Salmon et al., 2009). La population de cette ville a enregistré une importante croissance. Elle est passée de 26 021 habitants en 1966 à 190 200 habitants en 2020, ce qui constitue une multiplication par plus de sept sur une cinquantaine d'années. En conséquence de cette explosion démographique, de véritables problèmes se manifestent actuellement, comme la consommation non maîtrisée des espaces, la propagation des quartiers spontanés, notamment dans des sites inappropriés à l'urbanisation, des problèmes d'accessibilité et de congestion urbaines, ainsi que des problèmes liés à la qualité du cadre bâti et à la perte de l'identité oasienne et touristique de la ville (Dechaicha, 2013 ; Salmon et al., 2009).

2.2. Données et matériel utilisés

La présente étude consiste à mettre en évidence le processus de croissance spatiale qui caractérise la ville de Bou-Saâda pendant la période allant de 1984 à 2020, durant laquelle l'étalement des surfaces bâties semble s'être amplifié (Dechaicha, 2013). Dans cette optique, une série séquentielle constituée de quatre images multispectrales Landsat a été acquise par le biais de l'USGS (United States Geological Survey). Les images acquises correspondent aux années 1984, 1996, 2008 et 2020. Le choix des images a été effectué en réponse aux critères de similitude de conditions atmosphériques et phénologiques (Coppin et al., 2004 ; Lu et Weng, 2007). Les caractéristiques techniques des images obtenues sont illustrées dans le tableau 1.

Image	Capteur	Date	Bandes	RMSE (m)	Rés. spatiale (m)
Image 1	Landsat 5 TM	18-04-1984	1-2-3-4-5-7	4.312	30
Image 2	Landsat 5 TM	19-04-1996	1-2-3-4-5-7	10.580	30
Image 3	Landsat 7 ETM+	28-04-2008	1-2-3-4-5-7	4.071	30
Image 4	Landsat 8 OLI-TIRS	23-05-2020	2-3-4-5-6-7	5.947	30

Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat utilisées

Des documents complémentaires de référence sont ainsi utilisés. Il s'agit d'une photo aérienne prise en 1985, de trois plans parcellaires correspondant aux années 1998, 2008 et 2016, ainsi que de quatre images satellitaires (1984 – 1996 - 2000 - 2020) fournies en coloration naturelle par l'USGS. Le recours à ces images historiques permet de vérifier les surfaces situées en dehors des périmètres urbains et non couvertes par les plans parcellaires. La chaîne de traitement (classification et post-classification) des images satellitaires est effectuée au moyen du logiciel QGIS (Congedo, 2021 ; Leroux et al., 2018).

Il importe de noter que la résolution spatiale des images Landsat sélectionnées limite l'analyse aux échelles urbaines globales, celles des macroformes des taches urbaines. Pour des échelles plus fines, celles des quartiers par exemple, cette résolution ne serait pas pertinente du fait de l'effet « mixel » qui serait engendré et qui influencerait négativement la qualité des résultats obtenus (Lu et Weng, 2007 ; Phiri et Morgenroth, 2017).

2.3. Méthodologie de travail

La méthode suivie comporte quatre étapes (figure 2) : le calibrage et la normalisation des images acquises ; la classification et le post-traitement des images ; la validation de la classification obtenue ; la comparaison post-classification des cartes thématiques obtenues à la suite de la classification (Ban et Yousif, 2016 ; Dengsheng Lu et Weng, 2007; Nath et al., 2014).

2.3.1. Calibrage et normalisation des images

Cette étape de prétraitement consiste à homogénéiser les différences dues aux conditions atmosphériques et au positionnement des capteurs, qui existent lors de la prise des vues ou de l'enregistrement des images brutes. De prime abord, les images acquises ont nécessité une correction géométrique afin de faciliter leur superposition. Le géoréférencement a été appliqué image par image, avec comme document de référence l'image de Landsat OLI-TIRS, retenue pour sa qualité. Vingt-et-un points de contrôle ont été repérés pour entamer la rectification géométrique des images selon le système de référencement géographique WGS 84, zone 31 Nord. Cette opération a permis d'améliorer la précision géométrique et de réduire l'erreur à une valeur tolérable (moins de 0.22 pixel). Une vérification visuelle

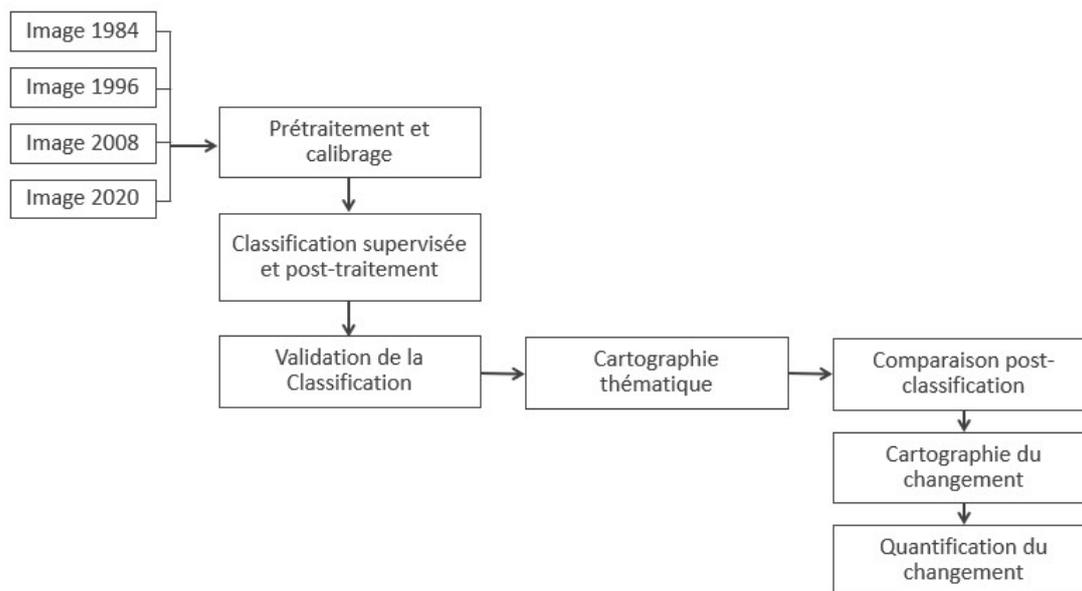


Figure 2 : Démarche méthodologique

de la superposition des images a également été effectuée. La zone d'étude est extraite en délimitant une fenêtre pentagonale de découpe incluant l'actuel périmètre urbain et son environnement immédiat. Elle est incluse entre les longitudes 4°7'37" et 4°37'35" Est, et les latitudes 35°16'23" et 35°10'36" Nord. Étant donné que les images brutes de Landsat sont fournies en radiance avec des valeurs numériques (DN), un calibrage radiométrique est ainsi effectué en exécutant une conversion des radiances en unités de réflectance de type TOA (Top Of Atmosphere) et une soustraction des objets non attribués en appliquant le modèle DOS1 (Dark Object Subtraction) (Congedo, 2021 ; Haque et Basak, 2017 ; NASA, 2011 ; Tucker et al., 2004). Par la suite, un traitement de rehaussement des images est appliqué afin d'améliorer leur qualité visuelle et de faciliter en même temps leur photo-interprétation. Une composition colorée en fausses couleurs a été retenue avec la combinaison des bandes (4-3-2) pour les images TM et ETM+ et (5-4-3) pour celle de l'OLI-TIRS (figure 3). Cette composition, après plusieurs combinaisons, a montré de meilleures discriminations des surfaces et des objets constituant les différents types d'occupation du sol (Collet et Caloz, 2001).

La composition en fausses couleurs illustrée dans la figure 3 (4-3-2 pour les images TM et ETM+, et 5-4-3 pour L'OLI-TIRS) permet de discriminer les différents éléments composant le paysage oasien de Bou-Saâda (Weber, 1995).

L'image de 1984 (TM5) présente une forme paysagère plus compacte, aussi bien pour le tissu urbain (en bleu grisé) que pour la palmeraie (en rouge). Le tissu urbain est enserré de part et d'autre par deux montagnes : « Djebel Kerdada » à l'est et « Djebel Azzedine » à l'ouest. Au nord-est, il est délimité par la palmeraie et L'Oued de Maïtar : un Oued à sec

caillouteux (surfaces brillantes) avec des lits en sable. En parallèle à cet Oued, s'allonge d'ouest en est un cordeau dunaire (en couleur aurore et orangée) qui constitue une autre barrière naturelle venant endiguer la croissance de la ville. La palmeraie (en couleur rouge) se présente comme une entité homogène et compacte, délimitée d'un côté par le tissu urbain à l'ouest, et d'un autre côté par la route de Biskra (RN°46) au nord.

On peut également remarquer que les axes routiers constituent des éléments structurant le paysage « Bou-Saâdi » : la route d'Alger (RN°08) vers le nord, la route de Biskra (RN°46) vers l'est, et la route de Djelfa vers le sud (allongement de la RN° 46).

L'image de 1996 (TM5) montre que le tissu urbain a commencé de s'étaler pour prendre une forme plus allongée sur un axe sud-ouest nord-est. Les extensions urbaines commencent à franchir les barrières physiques délimitant naturellement l'oasis (L'Oued de Maïtar au nord et la palmeraie à l'est et au nord-est). De nouvelles petites zones urbaines commencent également à prendre place de manière éloignée du tissu urbain existant, au-delà de L'Oued de Maïtar au nord. Ces nouvelles zones, moins denses, sont en cours de développement et marquent l'implantation de la ville nouvelle d'El-Baten.

L'image de 2008 (ETM+) présente un état des lieux différent de celui des années précédentes. Le tissu urbain commence à être fragmenté, avec une densification des nouvelles zones urbaines, notamment au niveau de la ville d'El-Baten au nord. L'étalement spatial de ces zones est orienté par les deux axes routiers : la route d'Alègre vers le nord et la route de Tيارت vers l'ouest. On observe également l'apparition de la nouvelle zone d'extension et d'activité (ZEA) au nord-est de la palmeraie et le long de l'axe routier de Biskra

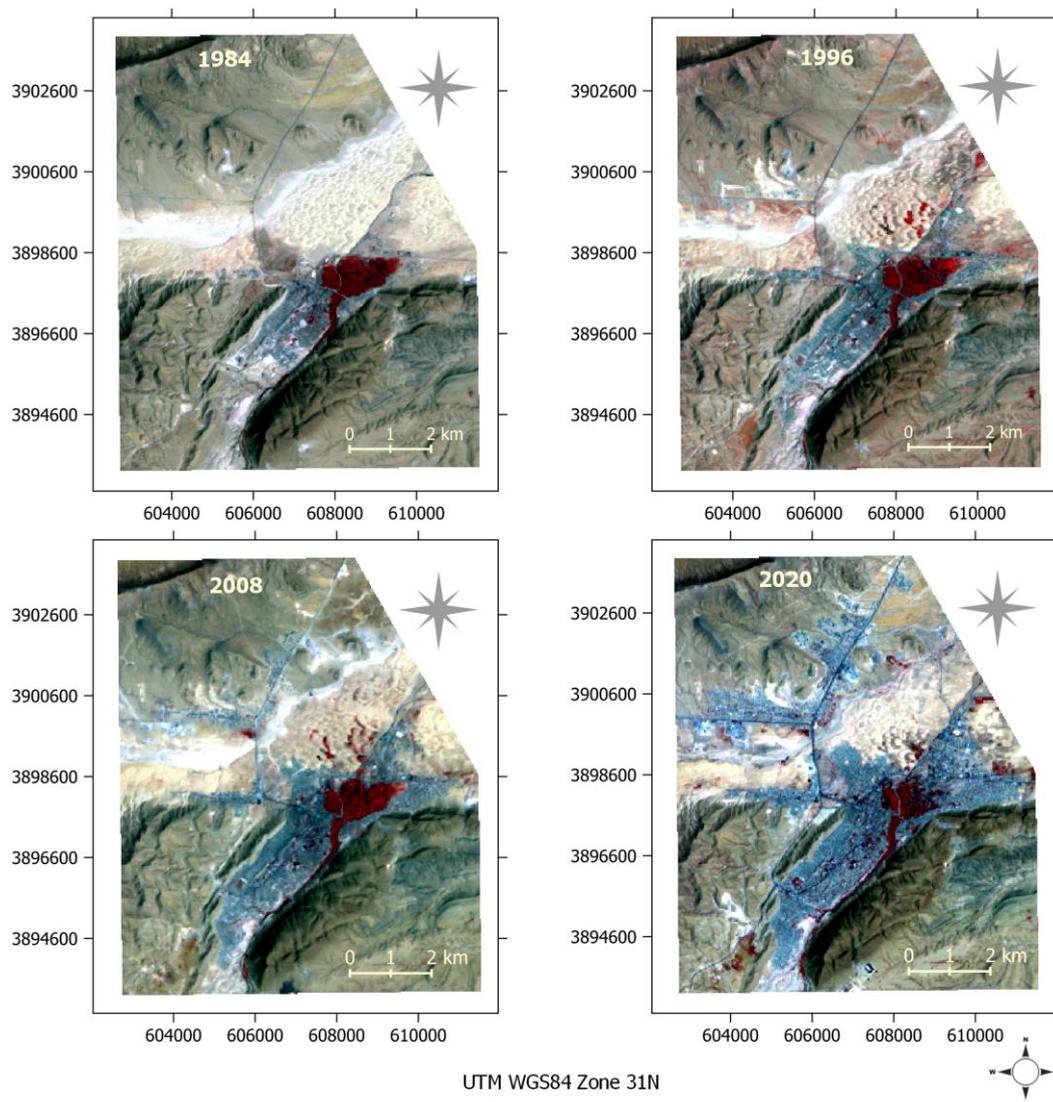


Figure 3 : Compositions en fausses couleurs des images utilisées (1984 – 1996 – 2008 – 2020)

Bandes sélectionnées : 4-3-2 (TM et ETM+) : 5-4-3 (OLI-TIRS). Établie par les auteurs à partir des images USGS

vers l'est. La palmeraie commence à perdre sa compacité morphologique avec la disparition de quelques parties internes (apparition de poches vides ombrées en couleur noire) et le grignotage par les surfaces bâties, notamment dans la partie nord qui se situe en lisière de la route de Biskra.

L'état des lieux capté en 2020 (OLI-TIRS) montre un changement important dans la configuration paysagère. La ville s'est remarquablement étalée pour être composée de plusieurs fragments urbains de taille aussi importante que ceux qui ont été rencontrés précédemment. La palmeraie, complètement incorporée dans le périmètre urbain, a pratiquement perdu sa partie est au profit des surfaces bâties. La structure globale de la ville, devenue plus fragmentée, est influencée par la configuration du site et du réseau routier, d'où l'allongement des nouvelles extensions urbaines le long de la route d'Alger vers le nord, la route de Tiaret vers

l'ouest, et la route de Biskra vers l'est et le sud-est. Quelques quartiers péricentriques ont aussi enregistré des densifications de leur emprise spatiale, avec des extensions sur les limites naturelles, notamment au niveau du cordon dunaire et sur le lit Sud de l'Oued Maïtar au nord.

2.3.2. Classification et perfectionnement de la classification

La classification des données satellitaires consiste à attribuer à chaque pixel son appartenance en matière d'occupation du sol. La finalité de cette opération est de générer une carte thématique représentant l'état de l'occupation du sol à une date précise. Dans notre étude, la méthode de classification appliquée est de type supervisé, compte tenu de notre connaissance de terrain et des documents disponibles. Trois classes d'occupation du sol ont été prédéfinies selon la nomenclature FAO (2016) : 1- Surfaces urbanisées

(surfaces bâties et aménagées) ; 2- Palmeraie (phœniciculture) ; 3- Sol nu (sols non bâtis et non cultivés). Il convient de mentionner que certains « oueds à sec » existant dans la région, notamment l'oued de « Maïtar » au nord de la ville, sont considérés comme des Sols nus. L'échantillonnage des zones d'entraînement (zones de test) est établi par photo-interprétation des images en compositions colorées (figure 3), en correspondance avec les cartes de référence (Du et al., 2014 ; Munafò et Congedo, 2017). Des polygones représentatifs de différentes classes sont générés à travers l'algorithme « *Region Growing* ». En se basant sur le paramètre de « distance spectrale » du pixel sélectionné comme référence et des pixels avoisinants, cet algorithme permet de définir pour chaque classe une zone homogène constituée d'au moins 30 pixels similaires en matière de réponse spectrale. Cette étape d'échantillonnage sert à mesurer pour chaque classe d'occupation du sol ses propriétés spectrales, à partir desquelles sera effectuée la classification spectrale de l'ensemble des images utilisées (Congedo, 2021 ; Rajendran et Mani, 2015). Afin de réduire les confusions qui peuvent être produites, notamment au niveau des lisières entre les Zones bâties et les Sols nus, nous avons ajouté des sous-classes appartenant à la classe du Sol nu. Ces sous-classes correspondent particulièrement aux sols caillouteux des lits des oueds et aux zones rocheuses au niveau des piémonts des montagnes en périphérie de la ville.

Pour entamer la classification des images rehaussées, plusieurs algorithmes ont été testés. Il s'agit des algorithmes « *Spectral Angle Mapper* », « minimum de vraisemblance » et « maximum de vraisemblance ». Ce dernier a donné de meilleurs résultats par rapport aux premiers, notamment après calcul du paramètre « distance de Jeffries-Matusita », dont les valeurs étaient très proches de 2 (Richards et Jia, 2006). Il a donc été retenu pour acheminer la classification (Dengsheng Lu et Weng, 2007 ; Mather et Tso, 2016 ; Phiri et Morgenroth, 2017). Par la suite, une amélioration post-traitement est appliquée sur les cartes générées par la classification en vue de les rendre homogènes et comparables. Elle consiste à corriger les confusions induites par la classification et l'élimination des pixels isolés en appliquant un seuillage de 3x3 pixels. À la fin de cette opération de « classe majoritaire », chaque polygone ayant la taille inférieure à 2 pixels subira une réaffectation de classe en se voyant attribuer la valeur du polygone voisin le plus large (Collet et Caloz, 2001).

2.3.3. Validation de la classification

L'évaluation de la précision de la classification est nécessaire pour pouvoir passer à l'analyse thématique. La matrice de confusion est l'une des méthodes d'évaluation les plus courantes (Congalton, 1991). Un indice synthétique dérivé de la matrice de confusion est également utilisé dans l'évaluation de la précision. Il s'agit de l'indice Kappa (K_{hat}). C'est un indicateur de

qualité servant à mesurer la performance d'une classification multiclassées. Pour une valeur de K_{hat} supérieur ou égale à 0.8, la classification est statistiquement considérée acceptable ; pour une valeur de K_{hat} variant entre 0.4 et 0.8, la classification est jugée de qualité moyenne (Landis et Koch, 1977). Dans cette étude, l'évaluation de la précision est effectuée en procédant en premier lieu à une digitalisation de 200 pixels, sélectionnés comme points de contrôle, créés et répartis aléatoirement sur toute la zone d'étude et couvrant toutes les classes, puis, et en second lieu, à l'enregistrement des données réelles à partir de la photo-interprétation des cartes de référence. La matrice de confusion est ensuite générée après le calcul matriciel de comparaison.

2.3.4. Identification et quantification du changement spatiotemporel

Cette étape consiste à soumettre les cartes thématiques obtenues à la fin de la classification à une procédure de comparaison post-classification. La finalité de cette opération est d'élaborer une cartographie illustrant le changement spatiotemporel, ainsi que de quantifier les espaces changés et inchangés à partir des tableaux descriptifs générés à la fin du calcul. L'objectif de cette analyse est de visualiser et décrire quantitativement les tendances spatiotemporelles qui caractérisent l'étalement de la ville de Bou-Saâda durant la période d'étude. Trois intervalles successifs d'étude sont distingués : 1984 – 1996, 1996 – 2008 et 2008 – 2020. Pour chaque période, une cartographie indiquant l'évolution des différentes classes d'occupation du sol, complétée par un rapport descriptif illustrant les différents types de conversion de surfaces sont obtenus.

3. Résultats et discussion

3.1. Validation de la classification des images

Quatre cartes thématiques sont obtenues à l'issue de la classification des images. Ces cartes correspondent respectivement aux dates de 1984, 1996, 2008 et 2020. Les résultats de l'évaluation de la classification sont illustrés dans le tableau 2.

Type d'évaluation	1984	1996	2008	2020
Précision globale (%)	92.30	90.64	87.10	93.86
Précision classe « surface urbanisée » (%)	94.15	88.18	89.45	91.32
Précision classe « palmeraie » (%)	90.08	91.82	90.38	94.62
Indice Kappa (K_{hat})	0.89	0.91	0.90	0.94

Tableau 2 : Précision de la classification des quatre images 1984, 1996, 2008 et 2020

Le calcul des matrices de confusion pour ces quatre cartes a montré un niveau acceptable de précision, aussi bien pour les précisions globales (92.30, 90.64, 88.10, 93.86 respectivement) que pour l'indice K_{hat} dont les valeurs mesurées sont respectivement 0.89, 0.91, 0.90

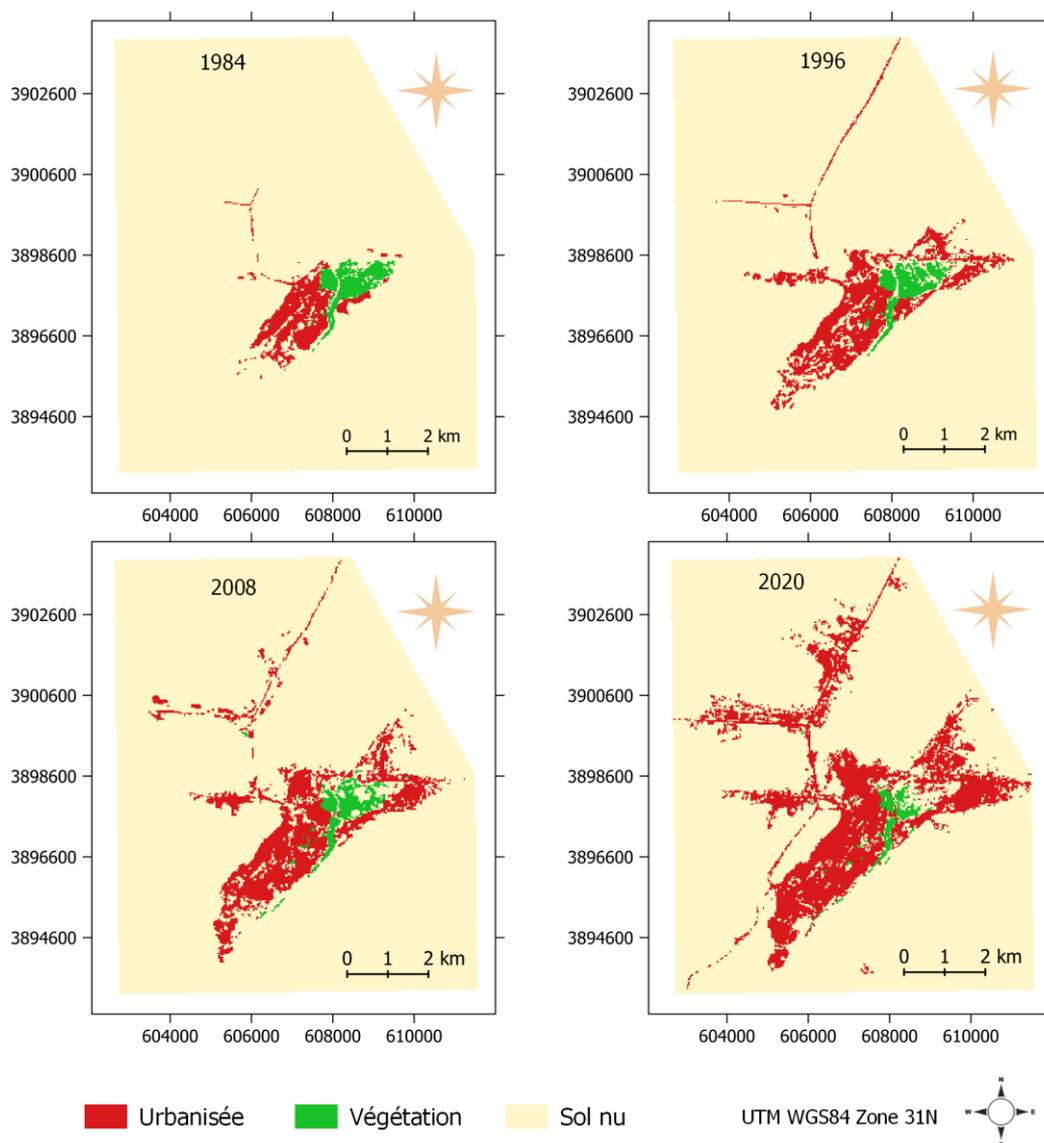


Figure 4 : Évolution spatiotemporelle des classes d'occupation du sol durant la période (1984 - 2020)

et 0.94. Ce niveau satisfaisant des valeurs de l'indice Kappa a été atteint à la suite d'une série d'améliorations post-traitement des premières cartes thématiques, obtenues directement à la fin de la classification. Ces corrections correspondent principalement aux confusions de classification entre Sols nus et Surfaces bâties, repérées particulièrement au niveau des surfaces caillouteuses et sableuses de l'oued de Maïtar. Cette opération post-traitement a conduit à l'amélioration de la précision des classes ciblées par l'analyse thématique, ainsi qu'à celle des valeurs synthétiques de l'indice K_{hat} (Tableau 2).

Il convient de mentionner que cette évaluation a néanmoins révélé quelques résultats erronés (néanmoins peu importants, en dehors du périmètre urbain), localisés principalement au niveau du lit sud de l'Oued Maïtar (au nord de la ville).

3.2. Cartographie du changement : un remarquable étalement du bâti

La classification supervisée des images satellitaires présentée précédemment a permis l'obtention d'une cartographie illustrant l'évolution spatiotemporelle de la ville de Bou-Saâda entre 1984 et 2020 (figure 4).

La première lecture cartographique des résultats illustrés dans la figure 4 révèle une nette croissance de la classe des Sols urbanisés, contre une régression importante de la classe de la Palmeraie. La croissance des surfaces urbanisées a pratiquement suivi toutes les directions, y compris le franchissement de la palmeraie. Cette composante verte était en dehors de la ville en 1984, mais l'étalement des espaces bâtis l'a progressivement intégrée au périmètre urbain. En analysant la cartographie diachronique, différents modes de croissance peuvent être distingués pour chaque période d'évolution.

Entre 1984 et 1996, la croissance spatiale du tissu urbain s'est caractérisée par un mode continu, par densification de la cuvette longitudinale jusqu'à saturation. Deux directions ont principalement guidé cette évolution spatiale (figure 3) : vers les sud-ouest avec l'apparition des quartiers spontanés de Sidi Slimane et les quartiers spontanés de Mennaâ ; vers le

Pendant la dernière période (2008 – 2020), les extensions urbaines sont principalement réalisées loin du centre historique, au niveau de la ville nouvelle et le long des axes routiers. Les quartiers périphériques (Sidi Slimane et Slimane Amirate au sud, la ZEA et les quartiers de la route de Biskra à l'est, et les quartiers de la nouvelle ville d'El-Baten le long des routes d'Alger au

Classe	Surface (ha)				1984 - 1996	1996 - 2008	2008 - 2020
	1984	1996	2008	2020	+/- (ha)	+/- (ha)	+/- (ha)
Surface urbanisée	236.34	533.70	691.92	1206.54	+297.36	+158.22	+514.62
Palmeraie	117.09	114.39	109.80	70.47	-2.70	-4.59	-39.33
Sol nu	8283.78	7989.03	7835.40	7360.2	-294.75	-153.63	-475.20

Tableau 3 : Évolution surfacique des classes d'occupation des sols (1984 – 2020)

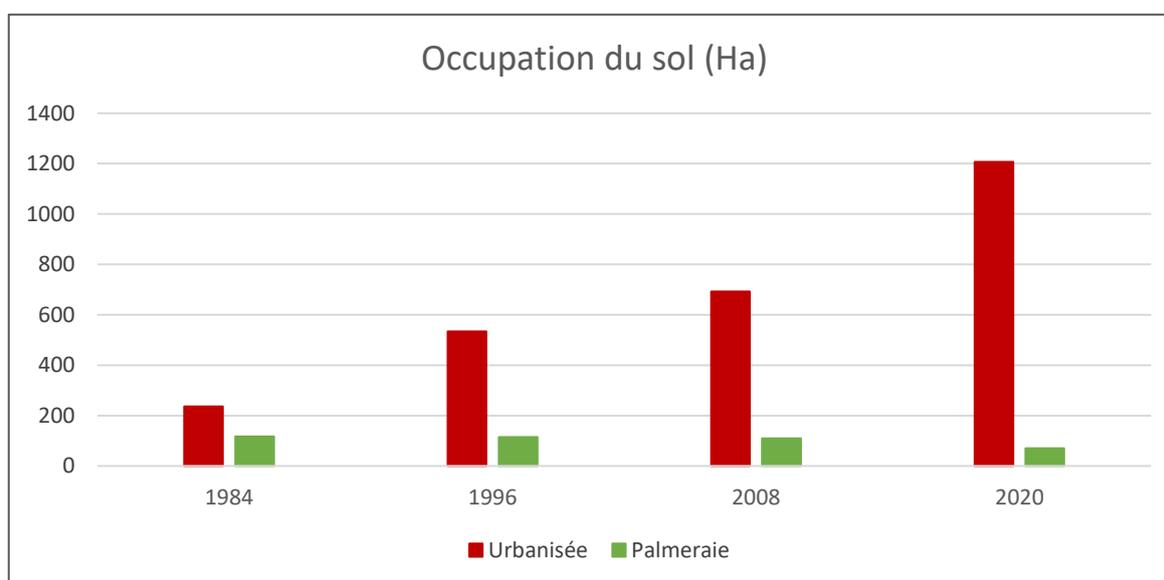


Figure 5 : Évolution des portions des surfaces urbanisées et des surfaces agricoles (1984 - 2020)

nord et le nord-est le long de la RN° 46, avec l'implantation et la croissance des lotissements résidentiels (20 août 1956, 1^{er} novembre 1945) et la zone d'activité et d'extension (ZEA). Au cours de la période 1996 – 2008, la croissance spatiale de la tache urbaine a suivi deux modes d'évolution. Dans un premier temps, un mode d'évolution continu se réalise particulièrement vers le sud (d'où l'extension du quartier de Sidi Slimane) et vers le nord (avec l'extension de la ZEA). Dans un second temps, après la saturation de la cuvette, de nouvelles extensions urbaines commencent à s'opérer plus loin, au-delà des limites physiques et naturelles (l'oued Maïtar au nord). Avec l'apparition de ces nouveaux fragments urbains, le tissu urbain de la ville de Bou-Saâda devient de plus en plus fragmenté.

nord et de Sidi Ameur à l'ouest) continuent d'accroître leurs surfaces bâties par extension et par densification des poches vides. Pendant cette même période, la dégradation de la palmeraie est devenue plus évidente, avec la disparition d'une bonne partie de sa surface à l'intérieur de cette trame verte et la propagation de nouvelles constructions sur les lisières, notamment le long la route de Biskra, ce qui modifie le paysage original et pour le transformer en façades urbaines.

Sur le plan quantitatif, les résultats de l'évolution surfaciques caractérisant les différentes classes d'occupation du sol sont illustrés dans le tableau 3 et la figure 5.

La figure 5 montre nettement l'ampleur de la croissance de la classe des Surfaces urbanisée par

rapport à celle de la palmeraie. Le tableau 3 met en valeur cette évolution, mais avec une variation de rythme entre les différentes périodes d'étude.

Durant la première période (1984 -1996), la classe des surfaces urbanisées a connu une croissance de son emprise au sol. Elle est passée de 236.34 ha en 1984 à 533.70 ha en 1996, avec une augmentation de 297.36 ha, soit une consommation surfacique annuelle estimée à 24.78 ha. En revanche, la palmeraie a connu un processus inverse. Sa surface a diminué, de 117.09 ha en 1984 à 114.39 ha en 1996, avec une perte de 2.7 ha, soit 2.31 % de surface perdue et 0.23 ha de perte annuelle. Pendant la seconde période (1996 – 2008), les surfaces urbanisées ont continué leur étalement pour atteindre une part surfacique de 691.92 ha en 2008, avec un gain de surface estimé à 158.22 ha, soit une évolution annuelle de l'ordre de 13.18 ha par an (contre 24.78 ha/an enregistrés entre 1984 et 1996). Un ralentissement de rythme de croissance par rapport à la

pendant cette dernière période que pendant les précédentes (24.78 ha/an pendant la période 1984 – 1996 et 24.78 ha/an pendant la période 1996 – 2008). Dans la même logique d'opposition, la palmeraie a continué à perdre de son espace. Sa surface a diminué jusqu'à enregistrer une valeur de 70.47 ha, ce qui constitue une perte globale de l'ordre de 39.33 ha, soit une perte annuelle estimée à 3.28 ha par an (contre 0.23 ha/an entre 1984 et 1996, et 0.38 ha/an entre 1996 et 2008). Le rythme de la perte surfacique est ainsi plus marqué pendant cette dernière période.

3.3. Des pertes en continu des espaces agricoles : une palmeraie en péril

La cartographie du changement (figure 6) illustre l'évolution spatiotemporelle des différentes classes d'occupation du sol et met en valeur les surfaces converties et non converties par le changement pour chaque classe et à chaque période d'étude.

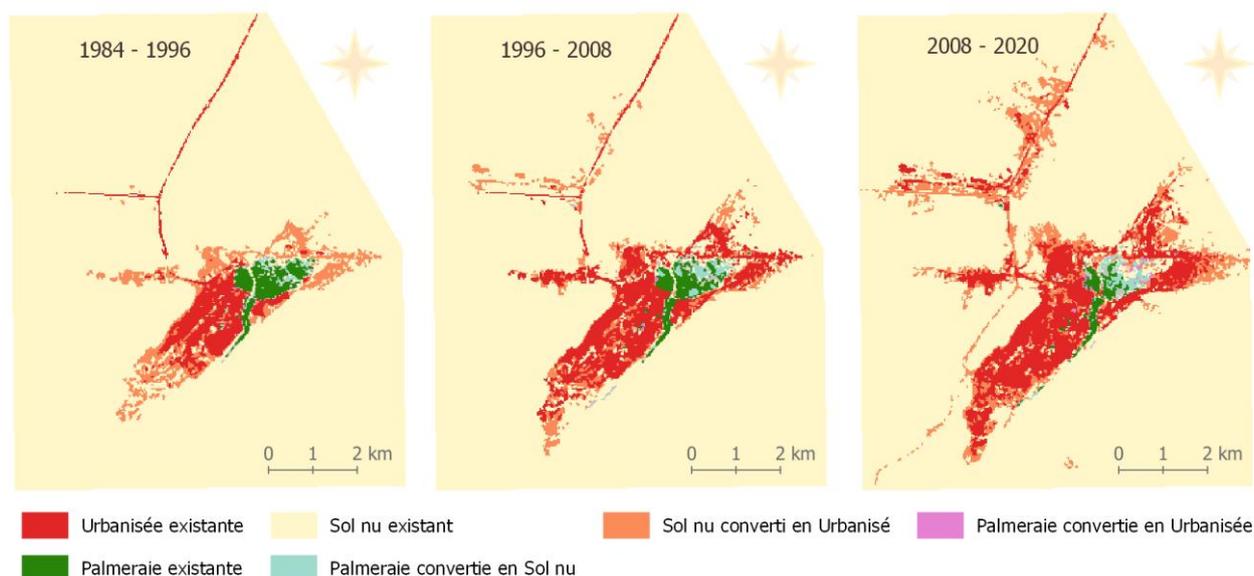


Figure 6 : Changement d'occupation du sol entre 1984 et 2020

première période est donc à noter. Par ailleurs, la palmeraie a continué à perdre de sa surface pour enregistrer 109.80 ha en 2008, ce qui constitue une perte globale de l'ordre de 4.59 ha, soit une perte annuelle égale à 0.38 ha par an.

La dernière période (2008 – 2020) est caractérisée par un important étalement de la classe du Bâti. Cette classe a gagné un total de surface estimée à 514.62 ha (contre 297.36 ha pendant la première période et 158.22 ha pendant la seconde période), pour atteindre le seuil de 1206.54 ha en 2020. En 2020, les zones urbanisées ont pu atteindre une valeur de 1206.54 ha d'emprise spatiale, soit une évolution annuelle estimée à 42.89 ha par an. Le rythme de croissance spatiale est plus marqué

Les résultats présentés dans la figure 6 montrent les transformations spatiotemporelles affectant le paysage oasien de Bou-Saâda. Plusieurs types de conversion de classes d'occupation du sol peuvent être notés, mais les plus remarquables concernent les surfaces converties par le bâti, à savoir les Sols nus et les Surfaces agricoles appartenant à la palmeraie. Entre 1984 et 1996, les surfaces avoisinant le tissu urbain sont les plus touchées par l'évolution urbaine. La conversion de la palmeraie a commencé avec un processus de dégradation des parcelles intérieures jusqu'à constituer des espaces vides. Entre 1996 et 2008, le processus de perforation de cette entité verte continue, notamment dans la partie est et la bande avoisinant la route de Biskra. Pendant la dernière période (2008 – 2020), on peut constater qu'une

bonne partie de la palmeraie est perdue, et transformée soit en surface bâtie, soit en terrain nu.

La quantification du changement d'occupation du sol a permis la mise en valeur de l'impact des extensions incontrôlées des zones urbaines sur l'espace de la palmeraie grâce à une procédure de calcul prenant en compte aussi bien les surfaces agricoles converties par la classe du bâti que les surfaces dégradées qui sont converties en sols nus. Les résultats obtenus pour chaque intervalle d'étude sont illustrés par la figure 7.

(THR). La figure 8 montre l'impact négatif que subissait la palmeraie résultant de l'urbanisation incontrôlée (figure 8). Des extensions de typologie résidentielle, moins denses, se propagent progressivement pour modifier la vocation agro-oasienne de cette bande urbaine verte. Les parcelles limitrophes de la route de Biskra (RN°46) sont pratiquement converties en constructions majoritairement commerciales et de services.

On remarque également que d'autres parcelles de

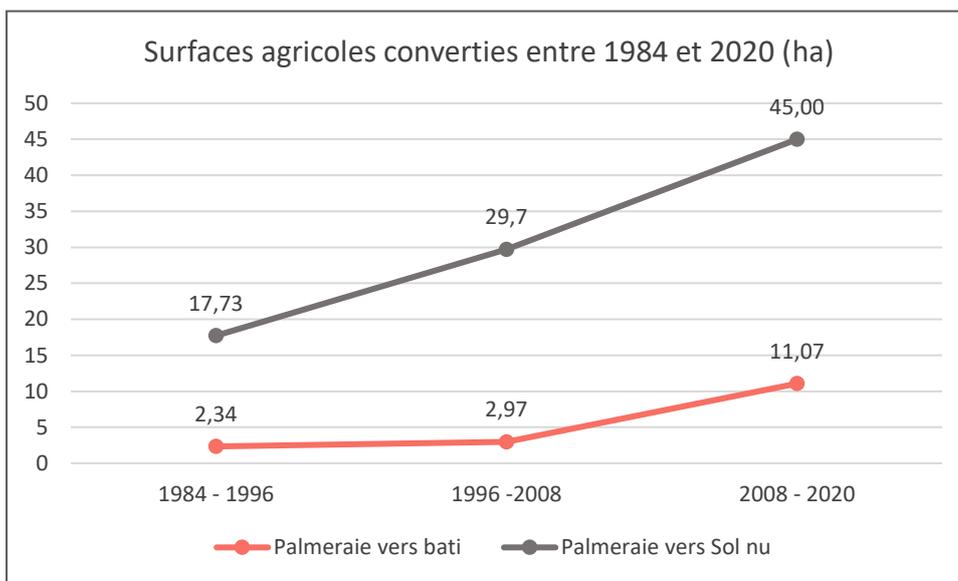


Figure 7 : Quantité des surfaces agricoles perdues à chaque période d'étude

Les résultats illustrés par la figure 7 montrent un processus progressif de conversion et de perte de surfaces agricoles au profit des extensions urbaines, avec une variation de l'ampleur du phénomène entre les différentes périodes d'étude. Entre 1984 et 1996, les surfaces envahies par le bâti étaient de l'ordre de 2.34 ha. Cette quantité perdue a enregistré une augmentation de valeur au cours de la seconde période d'étude (1996 – 2008) pour arriver à 2.97 ha. La plus grande perte de surfaces est enregistrée pendant la dernière période (2008 – 2020), durant laquelle les surfaces bâties ont pu convertir un total de 11.07 ha de surface agricole. Les résultats montrent aussi un processus régulier de dégradation de la palmeraie tout au long de la période d'étude. La quantité des surfaces perdues est passée de 17.73 ha enregistrés pendant la période allant de 1984 à 1996, à 29.7 ha pendant la seconde période, pour atteindre le seuil de 45 ha à la fin de la troisième période (2008 – 2020).

Les résultats de la détection des changements évoqués précédemment peuvent être mis en valeur en recourant à l'imagerie à très haute résolution spatiale

bordures n'ont pas pu échapper à ce processus de conversion spatiale, ce que montre notamment l'apparition d'un quartier résidentiel et spontané sur la partie sud-est de la palmeraie. Cette partie, qui est en contact direct avec des quartiers existants (cité Dachra Gueblia), constitue actuellement le prolongement spatial « naturel » des quartiers spontanés dans cette zone « non planifiée » de la ville. L'action volontaire a également sa part d'intervention sur cet espace agricole, avec l'implantation d'un collège (CEM) sur la lisière nord de la palmeraie. Ainsi, on peut constater que le processus d'envahissement des surfaces agricoles se réalise de manière progressive, en commençant dans un premier temps par les parcelles de pourtour, notamment celles situées à proximité des axes routiers dynamiques, pour pénétrer dans un second temps à l'intérieur de la palmeraie en modifiant la nature de son noyau. L'utilisation de l'imagerie THT peut donc être généralisée dans le cadre de futures recherches, afin de mettre en évidence la réalité morphologique et fonctionnelle des extensions urbaines incontrôlées sur l'ensemble de la ville.

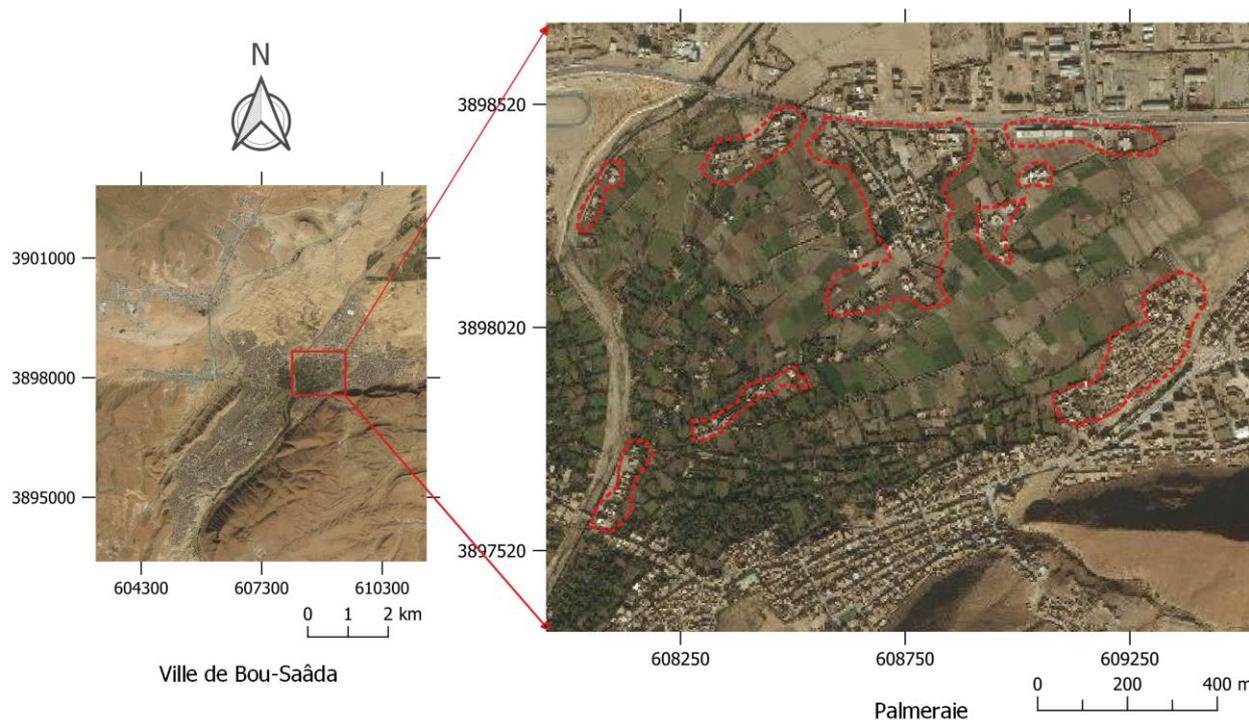


Figure 8 : Vue d'ensemble sur les extensions bâties établies sur la palmeraie
 Détail établi par les auteurs à partir d'une imagerie Google satellite (2021)

3.4. Discussion : deux tendances spatiales nettement opposées

La cartographie spatiotemporelle du changement d'occupation et d'utilisation du sol a révélé deux processus spatiaux nettement opposés : un important étalement des surfaces bâties, contre une réduction aussi remarquable de la palmeraie.

D'une part, la tache urbaine a connu une croissance continue de sa surface, mais avec une variation de rythme et de forme d'évolution entre les différentes périodes d'étude. Les extensions urbaines étaient plus marquées pendant la dernière période d'étude (entre 2008 et 2020), avec une consommation spatiale annuelle estimée à 42.89 ha/an. Sur le plan morphologique, cet étalement a chronologiquement suivi trois modes de croissance spatiale :

- Des extensions urbaines se développant dans un principe de continuité avec le tissu existant caractérisent la première période (1984 – 1996). Il s'agit d'une forme de densification urbaine traduite par l'apparition de nouveaux quartiers, planifiés et spontanés, implantés en périphérie mais en contiguïté avec les anciens quartiers ;
- Un passage du mode continu des extensions urbaines vers un mode discontinu durant la seconde période d'étude (1996 – 2008). La ville de Bou-Saâda a commencé à subir une fragmentation de sa forme urbaine à la suite de l'apparition de nouvelles zones

urbanisées implantées plus loin, notamment au nord (la nouvelle ville d'El-Baten et le quartier de Maïtar) ;

- Un mode de densification des nouvelles zones urbanisées (la nouvelle ville et les quartiers périphériques) a caractérisé la croissance spatiale tout au long de la dernière période d'étude (2008 – 2020). Les axes routiers (RN° 08 vers le nord et RN° 46 vers l'ouest) ont influencé la transformation de la forme urbaine pour aboutir à son état actuel.

D'autre part, la palmeraie a subi un processus inverse. Des pertes continues de surfaces agricoles ont été enregistrées durant la période d'étude, l'augmentation de l'ampleur de ce phénomène ayant été constatée au cours de la dernière période (2008 – 2020). La mesure du changement d'occupation et d'utilisation des sols, illustrée dans la figure 5, rend compte de la quantité des surfaces agricoles envahies par les extensions urbaines incontrôlées. Entre 1984 et 2020, la palmeraie a perdu un total de 46.62 ha, soit près de 40 % de sa part surfacique ; 11 ha de ses surfaces sont déjà bâtis, le reste a été transformé en interstices vides aptes à recevoir des futures constructions. Cet impact négatif montre le caractère non maîtrisé de l'urbanisation qui s'est opérée au détriment de la palmeraie.

4. Conclusion

L'application de la détection du changement a conduit à la visualisation et la cartographie des différentes formes d'urbanisation qui caractérisent l'évolution spatiale de la ville de Bou-Saâda pendant la

période allant de 1984 à 2020. Les résultats de l'analyse diachronique de la cartographie spatiotemporelle ont montré que le tissu urbain a connu un remarquable étalement de son emprise, alors qu'une diminution progressive de la surface de la palmeraie a été constatée. La cartographie du changement d'occupation et d'utilisation des sols a permis d'identifier les surfaces agricoles perdues et de mettre en valeur un processus de conversion des surfaces agricoles en Espace bâtis et en Sols nus. Les poches vides résultant de cette dégradation partielle de la palmeraie vont éventuellement être par la suite envahies par le bâti, ce qui contribue à la fragmentation et au grignotage de cette trame verte. Ce recul de superficie agricole au profit des surfaces bâties a mis en exergue le caractère incontrôlé des extensions urbaines qui s'opèrent au détriment de la palmeraie.

La quantification du changement d'occupation et d'utilisation du sol a conduit à révéler une variation du rythme de croissance spatiale de la tache urbaine, qui est plus rapide pendant la dernière période d'étude (2008 – 2020). L'ampleur de conversion des espaces de la palmeraie s'est aussi amplifiée pendant cette même période.

Il ressort également de cette étude que l'évolution de la tache urbaine a suivi dans un premier temps un mode continu de croissance spatiale, pour suivre par la suite un mode davantage éclaté, qui a contribué à rendre la forme urbaine plus fragmentée. Les axes de transport ont influencé l'orientation de l'urbanisation actuelle : les extensions urbaines s'opèrent loin du centre-ville, le long de ces axes. Cela est notamment le cas pour la RN° 08 qui va vers le Nord et la RN° 46 qui se dirige vers l'Est.

Ainsi, cette étude a montré l'importance des méthodes de détection du changement d'utilisation et d'occupation du sol, basées sur les images satellitaires et les SIG, pour le suivi et la compréhension de l'étalement incontrôlé des zones urbaines et l'estimation de ses impacts sur le potentiel agricole et naturel des territoires urbanisés. Dans une optique de durabilité urbaine, notamment dans les pays en voie de développement, la télédétection spatiale et les SIG constituent des outils efficaces dont il convient de généraliser l'exploitation pour mieux maîtriser et gérer la croissance spatiale rapide des villes.

Références

- Aguejdad, R., et Hubert-Moy, L. (2016). Suivi de l'artificialisation du territoire en milieu urbain par télédétection et à l'aide de métriques paysagères. Application à une agglomération de taille moyenne, Rennes Métropole. *Cybergeo: European Journal of Geography*, doc 766. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27465>
- Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine: Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin; 254p.
- Armand, M. (2016). Images satellitaires et planification des villes du Tiers-Monde. *Mondes en développement*, 44(175), 169-169. <https://doi.org/10.3917/med.176.0169>
- Ban, Y., et Yousif, O. (2016). Change Detection Techniques: A Review. In Y. Ban (Éd.), *Multitemporal Remote Sensing Methods and Applications* (p. 19-43). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_2
- CNES. (2002). *L'urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie: Inquiétudes actuelles et futures*. Rapport d'étude, CNES Alger. 112p. <http://www.cnes.dz/cnes/wp-content/uploads/Rapport-sur-l'urbanisation-et-les-risques-naturels-et-industriels-en-Algerie.pdf>
- Collet, C., et Caloz, R. (2001). *Précis de télédétection: traitements numériques d'images de télédétection*. Vol 3. Presses de l'Université du Québec; 386p.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Côte, M. (1998). Dynamique urbaine au Sahara. *Insaniyat*, 5, 85-92. <https://doi.org/10.4000/insaniyat.11818>
- Dechaicha, A. (2013). *L'étalement urbain et les contraintes physiques et naturelles Cas d'étude: La ville de Bou Saâda*. Mémoire de Magistère. Univ. Bisra. 325p. http://thesis.univ-biskra.dz/1422/1/Archi_m2_2015.pdf
- Dechaicha, A., et Alkama, D. (2020). A Spatio-temporal cartography and landscape metrics of urbanization patterns in Algerian Low-Sahara. The case of Ouargla City. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 12(3), 1235-1252. <https://doi.org/https://doi.org/10.4314/jfas.v12i3.16>
- Dechalcha, A., et Alkama, D. (2020). Détection du changement de l'étalement urbain au Bas-Sahara algérien: apport de la télédétection spatiale et des SIG. Cas de la ville de Biskra (Algérie). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 222 SE-, 43-51. <https://doi.org/https://doi.org/10.52638/rfpt.2020.486>
- Du, P., Liu, P., Xia, J., Feng, L., Liu, S., Tan, K., et Cheng, L. (2014). Remote Sensing Image Interpretation for Urban Environment Analysis: Methods, System and Examples. *Remote Sensing*, 6(10), 9458-9474. <https://doi.org/10.3390/rs6109458>
- FAO. (2016). *Land Cover Classification System - Classification concepts*. Report, FAO. 40p. <http://www.fao.org/publications/card/en/c/93c7a130-2f12-4f7a-a317-011eef91c5af>
- Gamba, P., et Dell'Acqua, F. (2016). Change Detection in Urban Areas: Spatial and Temporal Scales. In Y. Ban (Éd.), *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications* (p. 45-61). Springer International

- Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_3
- Haque, M. I., et Basak, R. (2017). Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: A spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 251-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.003>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 138p. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Kouzmine, Y., et Fontaine, J. (2018). Démographie et urbanisation au Sahara algérien à l'aube du XXI^e siècle. *Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée*, 30. <https://doi.org/10.4000/emam.1426>
- Landis, J. R., et Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Leroux, L., Congedo, L., Bellón, B., Gaetano, R., et Bégué, A. (2018). Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Images and the Semi-Automatic Classification Plugin: A Northern Burkina Faso Case Study. In *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* (p. 119-151). John Wiley et Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119457107.ch4>
- Lu, D, Mausel, P., Brondizio, E., et Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365-2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Lu, Dengsheng, et Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Mas, J. F. (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4), 349-362. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874785>
- Mather, P., et Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data* (2nd éd.). CRC press; 376p.
- Munafò, M., et Congedo, L. (2017). Measuring and Monitoring the Extent of the Built Environment: Methodologies and Data Available. In C. Gardi (Éd.), *Urban Expansion, Land Cover and Soil Ecosystem Services* (p. 19-32). Rou.
- NASA. (2011). *Science Data Users Handbook*. 186p. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/Landsat7_Handbook.pdf
- Nath, S. S., Mishra, G., Kar, J., Chakraborty, S., et Dey, N. (2014). A survey of image classification methods and techniques. *Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), 2014 International Conference on*, 554-557.
- Phiri, D., et Morgenroth, J. (2017). Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review. *Remote Sensing*, 9(9), 967. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
- Rajendran, P., et Mani, K. (2015). Quantifying the Dynamics of Landscape Patterns in Thiruvananthapuram Corporation Using Open Source GIS Tools. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 5(10), 77-87. <http://euroasiapub.org/wp-content/uploads/2016/09/10EASOct-2751-1.pdf>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction* (4th éd.). Springer; 439p.
- Salmon, M., Ammiche, A., Guermit, A., Hadjab, M., Khalfallah, B., et Ozer, A. (2009). Boussaâda: Une ville touristique confrontée au développement urbain. Apports de la télédétection. *Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'AUF*. <http://hdl.handle.net/2268/165041>
- Sidi Boumedine, R. (2013). *L'urbanisme en Algérie, échec des instruments ou instruments de l'échec*. Les alternatives urbaines; 227p.
- Singh, A. (1989). Digital Change Detection Techniques Using Remotely Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989-1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Tucker, C. J., Grant, D. M., et Dykstra, J. D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering et Remote Sensing*, 70(3), 313-322. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.3.313>
- Weber, C. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Collection géomatique. Paris : Hemès; 185p.

TITRE ET LEGENDES EN ANGLAIS

MONITORING AND QUANTIFYING UNCONTROLLED URBANISATION: AN APPROACH BASED ON A MULTITEMPORAL ANALYSIS OF LANDSAT SATELLITE IMAGES. THE CASE OF THE TOWN OF BOU-SAADA (ALGERIA)

Figure 1: Location of the study area

Figure 2: Methodological framework

Figure 3: False colour compositions of the used images

Figure 4: Spatiotemporal evolution of the land use classes from 1984 to 2020

Figure 5: Evolution of the proportions of urbanised and agricultural areas (1984–2020)

Figure 6: Land use change between 1984 and 2020

Figure 7: Quantity of agricultural land lost during each study period

Figure 8: Bird's-eye view of the built expansions constructed on palm groves

Table 1: Characteristics of the used Landsat images

Table 2: Accuracy of the classification of the four images 1984, 1996, 2008 and 2020

Table 3: Surface evolution of the land use classes (1984–2020)