

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
École Nationale Supérieure des Sciences de la mer et de l'Aménagement du Littoral



**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN SCIENCES DE LA MER
OPTION : AMÉNAGEMENT DU LITTORAL**

*Utilisation de la télédétection du changement pour
la quantification de l'artificialisation des sols dans
les communes côtières de la wilaya d'Annaba*

Présentée par :

- ❖ **M. Ihab SOLTANI**
- ❖ **M. Mohyiddine BOUMEZBEUR**

Soutenu le 07/Janvier/2020 devant le jury suivant :

<i>Membre de jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Affiliation</i>	<i>Qualité</i>
M. Khoudir MEZOUAR	Maitre de Conférences A	ENNSMAL	Président
M ^{me} Siham BENZOUAI	Maitre-Assistante A	ENNSMAL	Promotrice
M. Samir GRIMES	Professeur	ENNSMAL	Co-Promoteur
M ^{lle} Mehdi KERAGHEL	Maitre-Assistante A	ENNSMAL	Examinatrice
M. Lounes FERNANE	Maitre-Assistant A	ENNSMAL	Examinateur

Promotion : 2019

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à louer "ALLAH" ; El Hamdoulil'Allah pour les bénédictions qu'il nous a accordées.

Ecrire des remerciements est toujours un exercice difficile. N'oublier personne sans tomber dans le catalogue. Eviter les platitudes sans tomber dans la grivoiserie.

Nous croyons que la première personne que nous souhaiterons remercier est notre promotrice du PFE M^{me}Siham BENZOUAI pour la suggestion de ce sujet, sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour avoir accepté de juger et d'examiner cette étude avec une rigueur scientifique.

Nous adressons nos sincères remerciements à M. Housseyn OTMANI, M. Abd. Rahman AS-SYAKUR et M. Alihsan SEKERTEKIN pour avoir répondu à certaines questions au cours de cette étude.

Nous tenons également à remercier nos parents, nos proches et nos amis pour leurs soutiens et leurs encouragements.

À tous ces intervenants, nous exprimons notre respect et notre gratitude.

Dédicaces

« Le seul bien est la connaissance et le seul mal est l'ignorance. »

- Socrate

Avec cette citation, nous consacrons cette réussite académique à
l'immense océan du savoir.

J'aimerais dédie cette étude à la mémoire de mes chers grands-pères, que
leurs âmes reposent en paix.

Ihab SOLTANI

J'aimerais profiter de ce moment pour dédier cette étude à la mémoire
du père bien-aimé, qu'il repose en paix

Mohyiddine BOUMEZBEUR

Table des matières

Introduction	17
Chapitre I: Généralités	
1. Télédétection.....	20
2. Spectre ÉM et télédétection	20
2.1. Interactions de l'énergie ÉM avec l'atmosphère.....	20
2.1.1. Absorption et transmission	21
2.1.2. Diffusion atmosphérique.....	21
3. Capteurs passifs et actifs.....	21
4. Caractéristiques d'images de télédétection.....	21
5. Télédétection optique.....	22
5.1. Caractéristiques de réflectance de certains types des cibles de surface.....	22
6. Télédétection hyperfréquence	23
6.1. Radars imageurs.....	23
6.1.1. Bandes spectrales des radars imageurs	24
6.1.2. Polarisation hyperfréquences	24
6.1.3. Radar à synthèse d'ouverture.....	24
7. Satellites d'observation de la Terre.....	24
7.1. Programme Landsat	25
7.2. Programme Copernicus.....	26
7.2.1. Mission Sentinel-1	26
7.2.1.1. Données IW-SLC	27
7.2.1.1.1. Cohérence interférométrique.....	28
7.2.2. Mission Sentinel-2	28
7.2.2.1. Types de produits	29
8. Télédétection du changement	30
8.1. Télédétection du changement bitemporelle	31
8.1.1. Méthode de photo-interprétation	31
8.1.2. Méthodes préclassificatoires.....	32
8.1.2.1. Méthodes basées sur des opérations ponctuelles	32
8.1.2.1.1. Différence d'images.....	32
8.1.2.1.2. Division d'images.....	35
8.1.2.1.3. Analyse par vecteur de changement.....	35
8.1.2.2. Méthodes basées sur la transformation globale de l'image	35
8.1.2.2.1. Analyse en composantes principales.....	36
8.1.2.2.2. Transformation « Tasseled Cap »	36
8.1.3. Méthode de classification d'images.....	37
8.1.3.1. Techniques de classification d'images.....	37
8.1.3.1.1. Classification d'images non-supervisée	37
8.1.3.1.2. Classification d'images supervisée	37

8.1.3.1.2.1. Forêts aléatoires.....	38
8.1.4. Comparaison de classifications.....	39
9. Système d'information géographique.....	39
10. OpenStreetMap.....	40
Chapitre II: Contexte général de la zone d'étude	
1. Contexte général du littoral algérien.....	42
1.1. Pression sur le littoral.....	42
1.1.1. Population.....	42
1.1.2. Activités économiques.....	43
1.2. Législation au niveau national.....	43
2. Présentation et description de la zone d'étude.....	44
2.1. Localisation géographique.....	44
2.2. Relief et hydrographie.....	45
2.2.1. Massif de l'Edough.....	46
2.2.2. Oued Seybouse.....	46
2.2.3. Lac Fetzara.....	47
2.3. Aspect Administratif.....	47
2.4. Contexte socio-économique.....	48
2.4.1. Population.....	48
2.4.2. Infrastructures de base existantes.....	48
2.4.2.1. Infrastructures routières.....	48
2.4.2.2. Infrastructure Ferroviaire.....	48
2.4.2.3. Infrastructure portuaire.....	48
2.4.2.4. Infrastructure aéroportuaire.....	48
2.4.3. Infrastructures économique.....	48
2.4.3.1. Zones industrielles.....	48
2.4.3.2. Zones d'activités.....	49
2.4.4. Sites de recherche minière.....	49
3. Communes côtières comme zone focale.....	50
3.1. Population des communes côtières.....	50
3.2. Présentation du littoral.....	53
Chapitre III: Matériels et Méthodes	
Introduction.....	56
1. Identification des scènes.....	57
2. Traitement des données vectorielles.....	58
2.1. Éditeur des données vectorielles.....	59
2.1.1. Fusionnement des entités linéaires.....	59
2.1.2. Fractionnement du trait de côte.....	59
2.1.3. Création des bandes littorales.....	59
2.1.4. Ajout des attributs géométriques.....	59
3. Traitement des images satellites optiques.....	60

3.1. Données Landsat	60
3.1.1. Création d'une image composite	60
3.1.2. Extraction de la zone d'étude.....	61
3.1.3. Traitement des bandes thermiques.....	61
3.1.3.1. Landsat 7 ETM+	61
3.1.3.1.1. Conversion en radiance spectrale.....	62
3.1.3.2. Landsat 8 OLI/TIRS.....	63
3.1.3.2.1. Conversion en radiance spectrale.....	64
3.1.4. Mise en correspondance d'images.....	64
3.1.5. Transformation d'images.....	66
3.1.5.1. Calcul du NDVI	66
3.1.5.1.1. Calcul de la différence du NDVI	66
3.1.5.2. Calcul de l'EBBI	67
3.1.5.2.1. Calcul de la différence du EBBI	67
3.2. Données Sentinel-2	68
3.2.1. Correction atmosphérique.....	68
3.2.2. Extraction des bandes spectrales.....	68
3.2.3. Ré-échantillonnage spatial des bandes spectrales.....	69
3.2.4. Mosaïquage.....	69
3.2.5. Extraction de la zone d'étude.....	70
3.2.6. Mise en correspondance d'images.....	70
3.2.7. Transformation d'images.....	70
3.2.7.1. Calcul du NDVI	70
3.2.7.1.1. Calcul de la différence du NDVI	70
4. Traitement de données SAR - Sentinel-1.....	71
4.1. Extraction des bursts Sentinel-1 TOPSAR	71
4.2. Application du fichier d'orbite précis	71
4.3. Mise en correspondance d'images.....	72
4.4. Enhanced Spectral Diversity	72
4.5. Estimation de la cohérence	73
4.6. Fusionnement des bursts	73
4.7. Traitement multivisé	73
4.8. Correction de terrain	74
4.9. Extraction de la zone d'étude.....	75
5. Caractéristiques des images résultantes	75
5.1. Images de différence d'indice spectral	75
5.2. Images de cohérence	76
6. Estimation du changement.....	77
6.1. Image de différence du EBBI	77
6.1.1. Extraction des communes côtières.....	77
6.1.2. Sites d'entraînement	78

6.2. Images de cohérence	80
6.2.1. Extraction des communes côtières.....	80
6.2.2. Sites d'entraînement	80
6.3. Classification supervisée d'images	81
7. Traitement des données MNT.....	81
Chapitre IV: Résultats et Interprétations	
1. Résultats du traitement des couches SIG vecteurs.....	84
2. Résultats et analyse du changement.....	87
2.1. Commune d'Annaba	89
2.1.1. Changement entre 2000 et 2015	89
2.1.1.1. Analyse qualitative.....	89
2.1.1.2. Analyse quantitative.....	94
2.1.2. Changement entre 2015 et 2019	96
2.1.2.1. Analyse qualitative.....	96
2.1.2.2. Analyse quantitative.....	97
2.2. Commune d'El Bouni	100
2.2.1. Changement entre 2000 et 2015	101
2.2.1.1. Analyse qualitative.....	101
2.2.1.2. Analyse quantitative.....	103
2.2.2. Changement entre 2015 et 2019	105
2.2.2.1. Analyse qualitative.....	105
2.2.2.2. Analyse quantitative.....	107
2.3. Commune d'Oued El Aneb.....	110
2.3.1. Changement entre 2000 et 2015	111
2.3.1.1. Analyse qualitative.....	111
2.3.1.2. Analyse quantitative.....	113
2.3.2. Changement entre 2015 et 2019	115
2.3.2.1. Analyse qualitative.....	115
2.3.2.2. Analyse quantitative.....	117
2.4. Commune de Seraïdi.....	121
2.4.1. Changement entre 2000 et 2015	121
2.4.1.1. Analyse qualitative.....	121
2.4.1.2. Analyse quantitative.....	123
2.4.2. Changement entre 2015 et 2019	125
2.4.2.1. Analyse qualitative.....	125
2.4.2.2. Analyse quantitative.....	126
2.5. Commune de Chetaïbi.....	130
2.5.1. Changement entre 2000 et 2015	130
2.5.1.1. Analyse qualitative.....	130
2.5.1.2. Analyse quantitative.....	132
2.5.2. Changement entre 2015 et 2019	134

2.5.2.1. Analyse qualitative.....	134
2.5.2.2. Analyse quantitative.....	135
3. Estimation de la superficie des zones urbaines.....	139
Conclusion.....	141
Bibliographie.....	144
Annexes	152

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de la wilaya d'Annaba en Algérie	45
Figure 2. Représentation TIN en 3D de la topographie de la wilaya d'Annaba.....	46
Figure 3. Représentation du relief et des réseaux hydrographiques de la wilaya d'Annaba (Conception P. Pentsch).....	47
Figure 4. Localisation des communes côtières de la wilaya d'Annaba	51
Figure 5. Délimitation du littoral de la wilaya d'Annaba.....	54
Figure 6. Éléments morphologiques de la cote Algérienne (Wilayas d'Annaba et d'El Tarf) (Source : MATE 2008)	55
Figure 7. Bande thermique 6-1 de l'ETM+ du 27 juin 2000 (vue sur la ville d'Annaba), à gauche avant le traitement à la radiance spectrale, à droite après le traitement à la radiance spectrale (interface du logiciel SNAP).....	64
Figure 8. Image de sortie issue de la mise en correspondance d'images Landsat (Interface d'ERDAS IMAGINE AutoSync Workstation).....	66
Figure 9. Géométrie des distorsions topographiques dans les images SAR (Source : ESA SNAP help contents).....	75
Figure 10. Images de cohérence interférométrique de la wilaya d'Annaba, à gauche en 2015, à droite en 2019 (Interface du logiciel SNAP)	77
Figure 11. Application d'une échelle de couleurs à l'image de la différence du EBBI de la commune d'Annaba (Interface du logiciel QGIS).....	79
Figure 12. Numérisation des sites (zones) d'entraînement sur l'image de la différence du EBBI entre 2000 et 2015 de la wilaya d'Annaba (Interface du logiciel QGIS).	81
Figure 13. Carte des bandes littorales de la commune d'Annaba	86
Figure 14. Carte des bandes littorales de la commune d'El Bouni	87
Figure 15. Carte des bandes littorales de la commune d'Oued El Aneb	87
Figure 16. Carte des bandes littorales de la commune de Seraïdi	88
Figure 17. Carte des bandes littorales de la commune de Chetaïbi	88
Figure 18. Composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune d'Annaba. (A) du 27 juin 2000 acquise par Landsat 7 ETM+, (B) du 29 juin 2015 acquise par Landsat 8 OLI/TIRS, le trait rouge matérialise les limites du massif de l'Edough numérisé à partir de Google Earth Pro	91
Figure 19. Carte des plans d'occupation des sols (POS) à date récente de la ville d'Annaba (Source : http://archidata.org/)	92
Figure 20. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »	93
Figure 21. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »	93
Figure 22. Port d'Annaba (a) Vue le 27 juin 2000 par Landsat 7 ETM+, (b) Vue le 29 juin 2015 par Landsat 8 OLI/TIRS, (c) Différence-NDVI entre 2000 et 2015, (d) Différence-EBBI entre 2000 et 2015.....	95
Figure 23. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »	96
Figure 24. Résultats (en ha) de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »	97
Figure 25. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'Annaba »	98
Figure 26. Vue d'ensemble de la commune d'Annaba, (A) et (B) Cohérence interférométrique en polarisation VV des données Sentinel-1 IW SLC, respectivement entre 01-13 juin 2015 et entre	

04-16 juin 2019, (C) Composition colorée « urbain fausses couleurs » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019	99
Figure 27. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015	100
Figure 28. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019	100
Figure 29. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Annaba »	102
Figure 30. Commune d'El Bouni, Composition colorée « urbain fausses couleurs » (A) Image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015, (B) Image Landsat 7 ETM+ du 27 juin 2000.....	103
Figure 31. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »	104
Figure 32. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »	104
Figure 33. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »	105
Figure 34. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »	106
Figure 35. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'El Bouni »	107
Figure 36. Embouchure de l'Oued Seybouse, El Bouni (A) Image Sentinel-2A MSI du 04 juillet 2015, (B) Image Sentinel-2A MSI du 23 juillet 2019, (C) Différence-NDVI entre 2015-2019	108
Figure 37. Commune d'El Bouni, (A) Composition colorée « fausses couleurs urbain » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV	109
Figure 38. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015	110
Figure 39. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019.....	110
Figure 40. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique entre 2015 et 2019 « Commune d'El Bouni »	112
Figure 41. Partie sud de la commune d'Oued El Aneb, Composition colorée « urbain fausses couleurs » (A) Image Landsat 7 ETM+ du 27 juin 2000, (B) Image Landsat 8 OLI/TIRS du le 29 Juin 2015.....	113
Figure 42. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb ».....	114
Figure 43. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb ».....	114
Figure 44. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb ».....	115
Figure 45. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »	116
Figure 46. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'Oued El Aneb ».....	117
Figure 47. Commune d'Oued El Aneb, (A) Composition colorée « végétation saine » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV	118
Figure 48. Vue d'ensemble du site de la nouvelle ville de Draa Erich (A) et (B) Composition colorée « végétation saine » des images Sentinel-2 respectivement de 2015 et de 2019, (C) et (D) Classification de la cohérence interférométrique de 2015 et de 2019	119
Figure 49. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015	120
Figure 50. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019	120
Figure 51. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats de classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Oued El Aneb ».....	122

Figure 52. Composition colorée « urbain fausses couleurs » d'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015 « Commune de Seraïdi »	123
Figure 53. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »	124
Figure 54. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »	124
Figure 55. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi » .	125
Figure 56. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »	126
Figure 57. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune de Seraïdi »	127
Figure 58. Commune de Seraïdi, (A) Composition colorée « végétation saine » d'image Sentinel-2 MSI vue le 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV	128
Figure 59. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015.....	129
Figure 60. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019	129
Figure 61. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Seraïdi »	131
Figure 62. Composition colorée « urbain fausses couleurs » de l'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015 « Commune de Chetaïbi »	132
Figure 63. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »	133
Figure 64. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »	133
Figure 65. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »	134
Figure 66. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »	135
Figure 67. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune de Chetaïbi »	136
Figure 68. Commune de Chetaïbi, (A) Composition colorée « végétation saine » d'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV	137
Figure 69. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015	138
Figure 70. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019	138
Figure 71. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Chetaïbi »	140

Liste des tableaux

Tableau 1. Découpage administratif de la wilaya d'Annaba (source : ONS).....	48
Tableau 2. Communes côtières et littorales de la wilaya d'Annaba	48
Tableau 3. Zones industrielles (ZI) de la wilaya d'Annaba (Source : ANIREF 2013)	49
Tableau 4. Zones d'activités (ZAC) de la wilaya d'Annaba (Source : ANIREF 2013).....	50
Tableau 5. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'Annaba	52
Tableau 6. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'El Bouni.....	52
Tableau 7. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'Oued El Aneb	53
Tableau 8. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune de Seraïdi	53

Tableau 9. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune de Chetaïbi	53
Tableau 10. Espaces terrestres remarquables du littoral de la wilaya d'Annaba.....	54
Tableau 11. ZEST du Littoral d'Annaba	55
Tableau 12. Bandes spectrales d'ETM+ et d'OLI traitées en fonction de la réflectance de surface	61
Tableau 13. Résultats du traitement des couches SIG vecteur de la wilaya d'Annaba.....	86
Tableau 14. Résultats du traitement des couches SIG vecteur des communes côtières d'Annaba	86
Tableau 15. Compositions colorées « urbain fausses couleurs » et « végétation saine » pour ETM+, OLI et MSI	90
Tableau 16. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »	96
Tableau 17. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'Annaba »	101
Tableau 18. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Annaba »	101
Tableau 19. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Annaba »	101
Tableau 20. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »	106
Tableau 21. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'El Bouni »	111
Tableau 22. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019.....	111
Tableau 23. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'El Bouni »	111
Tableau 24. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »	116
Tableau 25. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'Oued El Aneb »	121
Tableau 26. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Oued El Aneb ».....	121
Tableau 27. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Oued El Aneb ».....	121
Tableau 28. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »	125
Tableau 29. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015 « Commune de Seraïdi ».....	130
Tableau 30. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Seraïdi ».....	130
Tableau 31. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Seraïdi ».....	130

Tableau 32. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »	134
Tableau 33. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1 ^{er} et le 13 juin 2015 « Commune de Chetaïbi »	139
Tableau 34. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Chetaïbi ».....	139
Tableau 35. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Chetaïbi ».....	139
Tableau 36. Estimation de la superficie des zones urbaines des communes côtières de la wilaya d’Annaba en 2019 selon la classification de la cohérence interférométrique.....	141

Liste des équations

Équation 1. Différence d'images	32
Équation 2. NDVI	34
Équation 3. EBBI	34
Équation 4. Division d'images	35
Équation 5. Conversion en radiance spectrale-Landsat 7 ETM+	63
Équation 6. Conversion en radiance spectrale-Landsat 8 OLI/TIRS.....	65
Équation 7. NDVI-Landsat 7 ETM+	67
Équation 8. NDVI-Landsat 8 OLI/TIRS.....	67
Équation 9. Différence du NDVI.....	67
Équation 10. EBBI-Landsat 7 ETM+	68
Équation 11. EBBI-Landsat 8 OLI/TIRS.....	68
Équation 12. Différence du EBBI.....	68
Équation 13. NDVI-Sentinel-2 MSI	71

Liste des abréviations

ANDI : Agence Nationale de Développement de l'Investissement

ANIREF : Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière

BOA : Bottom Of Atmosphere

CN : Compte Numérique

C-SAR : C-band Synthetic Aperture Radar

DN : Digital Number

EBBI : Enhanced Built-Up and Bareness Index

ESA : European Space Agency

ETM+ : Enhanced Thematic Mapper Plus

GIZC : Gestion Intégrée des Zones Côtières

INCT : Institut National de Cartographie et de Télédétection

InSAR : Interferometric Synthetic Aperture Radar

IRCL : Infrarouge de courte longueur d'onde

IRL : Infrarouge lointain

IRT : Infrarougethermique

IW : Interferometric Wide swath

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

MATET : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et du Tourisme

MATEV : Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et de la Ville

MIR : Mid infrared

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSI : Multispectral imager

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NIR : Near infrared

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OLI : Operational Land Imager

ONS : Office National des Statistiques

OSM : OpenStreetMap

PDAU : Plan Directeur D'aménagement et d'Urbanisme

PIR : Proche infrarouge

POS : Plan d'Occupation des Sols

Radar : Radio detection and ranging

RAR : Real aperture radar (*radar à ouverture réelle*)

RGPH : Recensement Général de la Population

RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture

SAR : Synthetic Aperture Radar

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SLC : Single Look Complex

SWIR : Short wave infrared

TIN : Triangular Irregular Networks

TIRS : Thermal Infrared Sensor

TOA : Top Of Atmosphere

TOPSAR : Terrain Observation with Progressive Scans SAR

USGS : United States Geological Survey

UTM : Universal Transverse Mercator

WRS : Worldwide Reference System

ZEST :Zones d'Expansion et Sites Touristiques

ZET : Zone d'Expansion Touristique

Introduction

Introduction

Aujourd'hui, 91% de la population algérienne vit le long de la côte méditerranéenne sur 12% de la surface totale du pays et près de la moitié de la population est urbaine (MATE 2006). L'urbanisation continue à se propager malgré les efforts du gouvernement pour tenter de réduire la saturation démographique des villes côtières. À l'instar des villes côtières, Annaba a connu ces dernières décennies une forte urbanisation (Mellouk et Aroua 2015). Elle représente le 3^{ème} pôle démographique du littoral. Cela est dû aux flux migratoires des espaces ruraux vers les villes, et spécialement vers les zones côtières. De plus, les politiques et les choix économiques entrepris par l'état après l'époque coloniale ont aidé d'une façon directe et indirecte cet exode. Il s'agissait surtout d'une politique d'implantation des grandes zones industrielles (d'industrialisation et de littoralisation) (Zenniret al. 2018).

La littoralisation est le concept qui signifie, l'urbanisation (artificialisation) totale et linéaire de la bande littorale qui s'oppose à des espaces intérieurs qui se vident de leur substance et de leurs habitants (Moriconi-Ebrard et Dinard 2000). Elle représente aussi, le processus fréquemment observé de concentration des populations et des activités humaines le long ou à proximité des littoraux (Ghodbani et Berrahi-Midoun 2013).

En effet, mesurer l'artificialisation revient à mesurer les effets de l'activité humaine sur les territoires ; les transformations perpétrées depuis l'installation de peuplements humains ont modifié les paysages et les milieux naturels. « Le terme artificialisation est employé pour traduire un changement d'occupation du sol (forêt, zone agricole, zone humide, etc.) qui correspond à un changement d'utilisation, laquelle n'est pas nécessairement irréversible » conduisant à une occupation bâtie (zone urbanisée) ; extension des sols bâtis (urbanisation) ou en une occupation revêtue (routes, voies ferrées, parkings, chemins, etc.). Les sols artificialisés incluent aussi les chantiers, carrières, mines, décharges, etc. Ils recouvrent toutes les surfaces qui supportent l'activité humaine (exceptées l'agriculture et la sylviculture) (Chéry et al. 2014).

L'extension des centres urbains de la wilaya d'Annaba a entraîné une consommation considérable de l'espace (occupation du sol). Par conséquent, nous assistons aujourd'hui à l'apparition de grands ensembles d'habitat collectif à proximité des rivages de la mer et à des constructions individuelles éparpillées. Il est à signaler que ces emprises importantes se sont faites sur des zones agricoles et touristiques. A cet effet, la structure et les éléments du système urbain actuel d'Annaba affaiblissent la structure ancienne de la ville coloniale (ville-mère) et lui font perdre son caractère. L'absence d'autonomie et l'absence de repères au niveau spatial sont manifestes. Nous assistons actuellement à l'émergence d'un cadre bâti pauvre sur le plan architectural, incohérent sur le plan urbanistique, et qui ne constitue point le prolongement logique de l'existant que ce soit au niveau de l'occupation du sol, ou de la forme générée. Cette extension anarchique du tissu urbain dans la bande du littoral au niveau des trois communes côtières de la wilaya d'Annaba (Annaba, El Bouni et Chetaïbi) est estimée à 2333 hectares entre 1971 et 2002 (MATEV 2013).

Le suivi de ce processus d'artificialisation intensive, par les méthodes spatiales, apportera sans doute une forte contribution au diagnostic et à la prise de décision en matière de gouvernance territoriales.

La planification spatiale, pour l'atteinte des objectifs de développement durable, ou dans le cadre d'une approche de gestion intégrée GIZC, puisqu'il s'agit d'une grande ville côtière, nécessite l'accès à des données précises, à jour sur le changement de la couverture terrestre (du sol). Or, l'étude de la croissance urbaine dans les pays en voie de développement est limitée par de nombreux facteurs dont le plus important est l'absence de grandes bases de données, ce qui rend difficile le suivi et l'analyse de ce processus (Rabehi et al. 2018).

La télédétection spatiale constitue dans ce contexte une importante source de données pour les études sur l'évolution du milieu urbain, le suivi des activités d'artificialisation des sols et pour la cartographie des zones urbaines. Cette dernière a été amplement utilisée pour l'inventaire des ressources disponibles sur la surface terrestre. Grâce à la répétitivité d'acquisition des images spatiales de la surface terrestre, l'analyse des images multidates, c'est-à-dire des images saisies sur une même scène à des jours ou des époques différentes permet le suivi du changement de la surface terrestre (les changements de l'occupation du sol) (Mas 2000).

La disponibilité des données sur ces changements peut être d'une importance capitale pour la prise de décision dans la gestion et la planification spatiale et environnementale (Dronova et al. 2011). La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont des outils puissants et flexibles permettant d'extraire une information exacte, à jour et au moment opportun sur les changements de l'occupation du sol (Fournier 2008).

L'objectif globale de ce projet de fin d'étude est de cartographier et de quantifier l'augmentation des sols artificialisés au niveau des communes côtières de la wilaya d'Annaba durant les 19 dernières années et aussi de réaliser une cartographie récente des zones urbaines, à l'aide d'images de télédétection à moyenne résolution spatiale et à libre accès (données ouvertes).

Ce document s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à des notions de base de la télédétection ainsi qu'aux autres aspects théoriques nécessaires pour la compréhension de la thématique, le deuxième chapitre concerne la présentation du contexte générale du littoral algérien et les pressions exercées sur ce milieu (population, activités économiques, etc.), en se concentrant notamment sur la présentation et la description de la zone d'étude. Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé et expliqué la méthodologie proposée et suivie. Enfin, le quatrième chapitre englobe les résultats obtenus ainsi qu'une analyse ciblée et détaillée de ces derniers.

Chapitre I

Généralités

La télédétection spatiale est effectuée à l'aide de capteurs montés sur des satellites, des véhicules spatiaux et des stations spatiales (Bakker et al.2004). L'accent est mis sur la télédétection par satellite, car les satellites constituent une plate-forme plus commune (Weng 2012). Les capacités de surveillance du capteur sont dans une large mesure déterminées par les paramètres de l'orbite du satellite. En général, une orbite est une trajectoire circulaire décrite par le satellite dans sa révolution autour de la Terre. Différents types d'orbites sont nécessaires pour réaliser une surveillance continue (météorologie), une cartographie globale (cartographie de l'occupation du sol) ou une imagerie sélective (zones urbaines) (Bakker et al. 2004).

1. Télédétection

La télédétection comprend les techniques d'acquisition à distance des images ou d'autres formes d'enregistrements électromagnétiques de la surface de la Terre (continent et océan) et de l'atmosphère, ainsi que le traitement et l'analyse des données d'images pour extraire des informations utiles et ensuite mettre en application ces informations. La télédétection s'intéresse à la détection et à l'enregistrement de l'énergie du rayonnement électromagnétique des zones cibles à l'aide des capteurs embarqués sur des plates-formes aéroportées ou spatioportées ; ce rayonnement peut s'agir d'énergie solaire réfléchi par la cible ; ou de rétrodiffusion d'énergie transmise à la zone cible par le capteur lui-même, dans lequel on distingue les techniques passives et actives (Campbell et Wynne 2011; Weng 2012).

2. Spectre ÉM et télédétection

Le spectre électromagnétique est une distribution ordonnée des ondes électromagnétiques, en fonction de leur fréquence ou de leur longueur d'onde. Il s'étend des rayons gamma aux ondes radio (voir annexe 1). La télédétection fonctionne principalement dans les régions suivantes du spectre électromagnétique :

- La région optique : s'étend des rayons X ($0,02 \mu\text{m}$) à la partie visible jusqu'à l'infrarouge lointain, IRL ($1000 \mu\text{m}$) ; la partie visible s'étend approximativement de $0,4$ à $0,7 \mu\text{m}$ et son importance est associée au concept de couleur et la portion infrarouge (IR) s'étend approximativement de $0,7$ à $100 \mu\text{m}$. Cette dernière se divise en deux catégories ; l'IR réfléchi qui est utilisé de la même façon que le rayonnement visible et l'IR émis ou thermique qui donne des informations sur la température de surface.
- La région des hyperfréquences : couvre des longueurs d'onde de 1 mm à 1 m ; les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'IR thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio. Elles peuvent fournir des informations sur la rugosité et d'autres propriétés de la surface de la Terre. (Bakker et al. 2004).

2.1. Interactions de l'énergie ÉM avec l'atmosphère

Avant que l'énergie solaire n'atteigne la surface de la Terre, trois interactions fondamentales dans l'atmosphère sont possibles : absorption, transmission et diffusion. L'énergie transmise est ensuite réfléchi ou absorbée par le matériau de surface. Les effets atmosphériques peuvent avoir un impact considérable sur la qualité des données d'image générées par les capteurs spatioportés (Campbell et Wynne 2011).

2.1.1. Absorption et transmission

L'énergie électromagnétique qui traverse l'atmosphère est en partie absorbée par diverses molécules dont les absorbeurs les plus efficaces sont l'ozone (O₃), la vapeur d'eau (H₂O) et le dioxyde de carbone (CO₂). Cependant, certaines parties du spectre électromagnétique peuvent traverser l'atmosphère avec une atténuation faible ou nulle. Ces régions spectrales sont appelées fenêtres atmosphériques. On distingue quatre fenêtres principales définies par un intervalle de longueur d'onde où la télédétection spatiale est possible (voir annexe 2), à savoir :

- Le visible-proche infrarouge (0,4 à 2,5 μm).
- L'infrarouge moyen (*Mid-infrared-MIR*) (3 à 5 μm).
- L'infrarouge thermique (8 à 14 μm).
- Les hyperfréquences (1 à 30 cm) (Bakker et al. 2009).

2.1.2. Diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique se produit lorsque les particules ou les molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère font que les ondes électromagnétiques sont déviées de leur trajet initial ; trois types de diffusion sont connus, la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie et la diffusion non sélective. La quantité de diffusion pour les longueurs d'onde visibles est de 100%, en cas de couverture nuageuse, et de 5% en cas d'atmosphère dégagée, de l'énergie reçue par le capteur (Bakker et al. 2004).

3. Capteurs passifs et actifs

- Capteurs passifs : les capteurs passifs utilisent le soleil en tant que source d'éclairage, ils sont fortement influencés par les conditions atmosphériques. Citons, leurs caractéristiques principales :
 - Les systèmes de capteurs passifs basés sur la réflexion de l'énergie solaire ne peuvent fonctionner que pendant la journée.
 - Les systèmes de capteurs passifs qui mesurent les longueurs d'onde les plus longues liées à la température de la Terre ne dépendent pas du soleil en tant que source d'éclairage et fonctionnent de jour comme de nuit.
- Capteurs actifs : les capteurs actifs émettent un faisceau d'énergie contrôlé vers la surface et mesurent la quantité d'énergie renvoyée vers le capteur. L'avantage principal des systèmes de capteurs actifs est qu'ils peuvent être utilisés jour et nuit, qu'ils émettent un signal d'éclairage contrôlé et qu'ils ne sont généralement pas affectés par l'atmosphère (Bakker et al. 2004).

4. Caractéristiques des images de télédétection

Les données de l'image de télédétection sont des mesures de rayonnement électromagnétique. Elles sont stockées dans un format raster ou grille standard (lignes et colonnes) dont le plus petit élément est appelé « pixel ». À l'état brut, les mesures stockées dans les pixels sont appelées DN (*Digital Number*) ou CN (Compte Numérique). Pour chaque intervalle de longueurs d'onde mesuré, un ensemble de données est stocké, sous forme de bande spectrale, de canal, ou de couche (*Layer*).

Les caractéristiques de l'image sont celles du capteur duquel elle est issue :

- La résolution spatiale, est la plus petite distance observée sur le terrain.
- La résolution spectrale, qui se rapporte au spectre ou aux longueurs d'onde auxquelles le capteur est sensible.
- La résolution radiométrique, qui fait référence au nombre de bits (Nbits) sur lequel l'image est codée (8 bits, 12 bits, 16 bits, etc.). Elle détermine la plage dynamique de l'image [$0 - (2^{N_{\text{bits}}}-1)$]
- La résolution temporelle, fait référence au temps de revisite du satellite lequel correspond à la fréquence d'acquisition (Bakker et al. 2004).

5. Télédétection optique

La télédétection optique utilise les capteurs passifs dont la résolution spectrale s'étend des longueurs d'onde électromagnétiques du visible à l'infrarouge thermique (voir annexe 3), produisant des images à partir du rayonnement réfléchi et émis par la surface de la Terre et de l'atmosphère. Les cibles à la surface du sol sont imagées avec le rayonnement réfléchi par les longueurs d'onde du visible, du proche infrarouge (PIR, en anglais NIR) et de l'infrarouge de courte longueur d'onde (IRCL, en anglais SWIR). Les caractéristiques des cibles de surface peuvent être discriminées par leurs signatures spectrales optiques. Par exemple, l'IRCL est définie entre 1,4 et 3 μm (entre le PIR et le MIR). Elle revêt une grande importance dans la détection des objets « *man-made* ». Concernant les longueurs d'onde infrarouges thermiques émises, elles sont utilisées pour mesurer la température de la surface de la Terre (Emery et Camps 2017).

5.1. Caractéristiques de réflectance de certains types des cibles de surface

- Végétation : les caractéristiques de réflectance de la végétation dépendent des propriétés des feuilles (voir annexe 4). L'annexe 4 montre une courbe de réflectance spectrale typique de la végétation saine. Dans la partie visible du spectre, la réflexion de la lumière bleue et rouge est relativement faible, car ces parties sont absorbées principalement par la chlorophylle pour la photosynthèse alors que la lumière verte est relativement plus réfléchie. En revanche dans le proche infrarouge la réflectance est la plus élevée en raison de la structure cellulaire dans les feuilles.
- Sol nu : la réflectance de surface du sol nu dépend tellement de facteurs qu'il est difficile de donner une courbe de réflectance typique du sol nu. Les principaux facteurs qui influencent la réflectance sont la couleur du sol, la teneur en eau, la présence de carbonates et la teneur en oxyde de fer.
- Eau : la réflectance de l'eau est plus faible, elle reflète au maximum 10% du rayonnement incident de l'énergie électromagnétique dans le visible jusqu'au proche infrarouge. Au-delà de 1,2 μm , toute l'énergie est absorbée. Certaines courbes de différents types d'eau sont données (voir annexe 5). La réflectance la plus élevée est donnée par l'eau turbide (chargée de limon), et par l'eau contenant de la végétation avec un pic de réflexion de la chlorophylle à la longueur d'onde verte (Bakker et al. 2004).

6. Télédétection hyperfréquence

La télédétection hyperfréquence couvre la gamme des longueurs d'onde électromagnétiques des hyperfréquences. Ces longueurs d'onde relativement longues présentent l'avantage de pouvoir pénétrer les nuages ; elles sont indépendantes des conditions atmosphériques. Bien qu'elle soit principalement considérée comme une technique active, des capteurs passifs sont également utilisés ; ils fonctionnent de la même manière que les capteurs thermiques en détectant l'énergie hyperfréquence naturellement émise. En revanche, dans les systèmes actifs, l'antenne transmet des signaux hyperfréquences à la surface de la Terre où ils sont rétrodiffusés, la partie de l'énergie électromagnétique rétrodiffusée dans la direction de l'antenne est détectée par le capteur. L'utilisation de capteurs actifs ayant leur propre source d'énergie, présente certains avantages :

- L'acquisition des données à tout moment (jour en nuit).
- Étant donné que les ondes sont créées activement, les caractéristiques du signal sont entièrement contrôlées (par exemple, longueur d'onde, polarisation, angle d'incidence, etc.) et peuvent être ajustées en fonction de l'application souhaitée.

Les capteurs actifs sont divisés en deux groupes : les capteurs imageurs et les capteurs non imageurs. Les capteurs radars appartiennent au groupe des capteurs hyperfréquences actifs imageurs, les plus couramment utilisés. Le terme radar est un acronyme pour *radio detection and ranging*, qui signifie détection et télémétrie par radioélectricité (Bakker et al. 2009).

6.1. Radars imageurs

Les systèmes radars imageurs comportent plusieurs composants : un émetteur, un récepteur, une antenne et un enregistreur.

- L'émetteur sert à générer le signal hyperfréquence et à transmettre l'énergie à l'antenne à partir de laquelle il est émis vers la surface de la Terre.
- Le récepteur accepte le signal rétrodiffusé reçu par l'antenne, le filtre et l'amplifie selon les besoins de l'enregistrement.
- L'enregistreur stocke ensuite le signal reçu.

Le radar imageur acquiert une image dans laquelle chaque pixel contient un compte numérique (*Digital number*) en fonction de la force de l'énergie rétrodiffusée reçue du terrain. Il y a trois facteurs principaux influençant la force de l'énergie reçue rétrodiffusée :

- Les propriétés du système radar, à savoir la longueur d'onde, l'antenne et la puissance transmise,
- La géométrie du radar imageur, qui définit la taille de la zone éclairée en fonction, par exemple, de la largeur du faisceau radar (*Beam width*), de l'angle d'incidence et de la portée radar (*Radarrange*),
- Les caractéristiques d'interaction du signal radar avec les objets, à savoir la rugosité et la composition de la surface, la topographie et l'orientation du terrain (Bakker et al. 2009).

6.1.1. Bandes spectrales des radars imageurs

Similaires à la télédétection optique, les capteurs radars fonctionnent avec une ou plusieurs bandes différentes (gamme de longueurs d'onde). Pour une meilleure identification, une norme a été établie pour définir les différentes gammes de longueurs d'onde en utilisant des lettres pour distinguer les différentes bandes (voir annexe 6).

6.1.2. Polarisation hyperfréquences

La polarisation d'une onde électromagnétique décrit la direction de l'onde (horizontale ou verticale) à l'émission et à la réception. Elle est importante dans le domaine de la télédétection radar. En fonction de l'orientation des ondes radar émises et reçues, la polarisation produira des images différentes. Il est possible de travailler avec des ondes radar horizontales, verticales ou croisées. En utilisant différentes polarisations et longueurs d'onde, nous pouvons collecter des informations utiles pour des applications particulières.

- HH : polarisation horizontale lors de la transmission et de la réception.
- VV : polarisation verticale lors de la transmission et de la réception.
- HV : polarisation horizontale lors de la transmission et verticale lors de la réception.
- VH : polarisation verticale lors de la transmission et horizontale lors de la réception.

6.1.3. Radar à synthèse d'ouverture

Afin d'obtenir des résolutions spatiales utiles dans les images radars, les systèmes radar à ouverture réelle (*Real Aperture Radar*-RAR) ont leurs limites car il existe une limite physique à la longueur de l'antenne. D'autre part, le raccourcissement de la longueur d'onde réduira la capacité de pénétration des nuages. Pour améliorer la résolution spatiale, une grande antenne est synthétisée. La synthèse est réalisée en tirant parti du mouvement en avant de la plate-forme. En utilisant tous les signaux rétrodiffusés dans lesquels une contribution du même objet est présente, une très longue antenne peut être synthétisée. La plupart des systèmes radars aéroportés et spatioportés utilisent ce type de radar. Les systèmes utilisant cette approche sont appelés radar à synthèse d'ouverture (RSO) ou *synthetic-aperture radar* (SAR) en anglais (Bakker et al. 2009).

7. Satellites d'observation de la Terre

Les capteurs satellitaires offrent plusieurs avantages par rapport aux plates-formes aériennes. Ils peuvent fournir une vue synoptique, des détails fins et une couverture systématique et répétitive. Ces capacités sont bien adaptées à la création et à la maintenance d'une infrastructure cartographique mondiale et à la surveillance des nombreux problèmes environnementaux à grande échelle auxquels le monde est confronté aujourd'hui (Campbell et Wynne 2011).

Les satellites d'observation de la Terre (EOS) sont regroupés selon la résolution spatiale dans les catégories suivantes :

- Systèmes à basse résolution, avec une résolution spatiale de 1 km à 5 km ;

- Systèmes à résolution moyenne, avec une résolution spatiale comprise entre 10 et 100 m (Ex : Landsat 7, Landsat 8, Sentinel-2, etc.) ;
- Systèmes à haute résolution, avec une résolution spatiale inférieure à 10 m (Bakker et al. 2004).

7.1. Programme Landsat

Landsat est une initiative conjointe de l'institut d'études géologiques des États-Unis (*US Geological Survey-USGS*) et de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Les satellites Landsat ont presque continuellement acquis des images spatiales de la surface terrestre, fournissant ainsi des ressources précieuses pour la recherche dans l'utilisation des sols/les changements de l'occupation du sol, notamment la foresterie, l'agriculture, la géologie, l'aménagement du territoire et l'éducation.

ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite-1*, renommé Landsat 1) a été lancé en 1972 suivi de Landsat 2, Landsat 3 et Landsat 4 lancés respectivement en 1975, 1978 et 1982. Landsat 5 a été lancé en 1984, Landsat 6 a échoué au lancement en 1993. Cependant, Landsat 7 a été lancé avec succès en 1999 et continue à fournir des données mondiales si ce n'est la défaillance du système optique de correction des lignes de balayage (*Scan Line Corrector - SLC*) survenu le 31 mai 2003 laquelle a causé des vides à l'intérieur de l'image. Cependant, Landsat 8, lancé le 11 février 2013, poursuit normalement sa mission alors que le lancement provisoire de Landsat 9 est prévu pour 2020.

Les satellites Landsat 7 et Landsat 8 sont en orbite héliosynchrone à une altitude de 705 kilomètres avec une fauchée de 185 kilomètres, se déplaçant du nord au sud sur le côté ensoleillé de la Terre avec un temps de passage à 10h30, un temps orbital de 99 minutes, un nombre de 14 orbites par jour et un temps de revisite égale à 16 jours, leurs orbites sont décalées pour permettre une couverture répétée de 8 jours. Les scènes, d'une taille de 170 × 185 km sont répertoriées dans la grille « *Worldwide Reference System-2(WRS-2)* » qui divise le monde en 251 trajectoires orbitales (*Paths*) et 248 lignes (*Rows*).

Landsat 7 est équipé de l'appareil de cartographie thématique amélioré (*Enhanced Thematic Mapper Plus-ETM+*), ETM+ collecte des données avec une résolution spatiale de 30 mètres dans les régions de longueur d'onde visible, PIR et IRCL ainsi qu'une bande thermique de 60 mètres, rééchantillonné à 30 mètres et une bande panchromatique de 15 mètres (voir annexe 7).

Landsat 8 est équipé d'un radiomètre dit OLI (*Operational Land Imager*) d'une résolution spatiale de 30 mètres dans les parties du visible, du PIR et de l'IRCL, ainsi que d'une bande panchromatique de 15 mètres. OLI se caractérise par une bande bleu profond pour les études sur les aérosols et côtières et une bande pour la détection des nuages de cirrus (voir annexe 8). Landsat 8 dispose également d'un capteur infrarouge thermique (*Thermal Infrared Sensor - TIRS*) avec deux bandes thermiques d'une résolution spatiale de 100 mètres (ré-échantillonnées à 30 mètres) conçues pour permettre l'utilisation d'algorithmes de récupération de la température de surface à fenêtre divisée. Cependant, en raison de l'incertitude d'étalonnage plus grande associée à la bande 11, il est recommandé aux utilisateurs de ne pas utiliser les données de la bande 11.

L'USGS fournit des données de grande qualité corrigées systématiquement, radiométriquement et géométriquement avec correction de terrain. Deux niveaux sont à distinguer :

- Les produits de niveau-1 sont géoréférencés dans la projection cartographique UTM (*Universal Transverse Mercator*) associée au système géodésique mondial 1984 (*World Geodetic System-84* - WGS-84) et livrés au format GeoTIFF (*Geometric Reference Tagged Image File Format*) dans des fichiers compressés au format tar.gz. Les valeurs radiométriques des images correspondent à des réflectances au sommet de l'atmosphère (*Top Of Atmosphere-TOA*) avec les paramètres pour les transformer en radiance.
- Les produits de niveau-2 sont dérivés du produit de niveau-1 et corrigés atmosphériquement. Ils correspondent à des réflectances de surface (*Surface Reflectance-SR*).

Les produits de données Landsat niveau-1 conservés dans les archives de l'USGS peuvent être téléchargés gratuitement et sans restrictions à travers EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>), GloVis (<http://glovis.usgs.gov>) ou LandsatLook (<http://landsatlook.usgs.gov>). Les demandes de produits de données scientifiques Landsat niveau-2 (données de réflectance de surface) peuvent être effectuées à l'aide de EarthExplorer ou en accédant à l'interface à la demande ESPA d'EROS (*Earth Resources Observation and Science Center Science Processing Architecture*) (<https://espa.cr.usgs.gov>) (USGS2016).

7.2. Programme Copernicus

Copernicus est le tout récent programme de surveillance de la Terre de l'agence spatiale européenne (ESA). Il fournit des services dans six domaines : terre, mer, atmosphère, changement climatique, gestion des urgences et sécurité permettant un large éventail d'applications, notamment la protection de l'environnement, la gestion des zones urbaines, la planification régionale et locale, l'agriculture, la foresterie, la pêche, la santé, les transports, le développement durable et la protection civile.

Les satellites d'observation de la Terre qui fournissent les données exploitées par les services Copernicus sont divisés en deux groupes de missions : Les Sentinel-1, -2, -3, -5P et -6 sont des satellites dédiés, tandis que les Sentinel-4 et -5 sont des instruments embarqués sur les satellites météorologiques d'EUMETSAT (Emery et Camps 2017).

7.2.1. Mission Sentinel-1

Sentinel-1 est une mission radar conçue comme une constellation à deux satellites :

- Sentinel-1A lancé le 3 avril 2014.
- Sentinel-1B lancé le 25 avril 2016.

La mission est utile pour la surveillance marine, la surveillance des terres et les services d'urgence. Elle fournira à long terme une archive de données cohérent pour les applications reposant sur les séries chronologiques.

Les satellites identiques évoluent sur une orbite héliosynchrone, à une altitude de 693 km, inclinée de 98.18° et avec une configuration diamétralement opposée de 180° permettant de réduire ainsi le temps de revisite initialement de 12 jours à 6 jours. Le temps de revisite est à 18h00 avec 175 orbites par cycle.

Sentinel-1 porte une seule charge utile qui consiste en un instrument radar à synthèse d'ouverture (RSO) en bande C (*C-band Synthetic Aperture Radar - C-SAR*). Les Modes d'acquisition sont :

- Mode cartographique de bandes (*Strip Map -SM*) :

Une fauchée de 80 km et une résolution spatiale de 5×5 m.

- Mode interférométrique (*Interferometric Wide Swath-IW*) :

Une fauchée de 250 km et une résolution spatiale de 5×20 m.

- Mode fauchée de grande largeur (*Extra-Wide Swath - EW*) :

Une fauchée de 400 km et une résolution spatiale de 20×40 m.

- Mode ondes (*Wave Mode - WV*) :

Des images de 20×20 km avec une résolution spatiale de 5×5 m sont prises tous les 100 km.

Sur les continents, Sentinel-1 opère principalement en IW alors que sur les mers et les océans, il opère principalement en WV. Le mode WV supporte uniquement la polarisation simple (VV ou HH) alors que les modes SM, IW et EW supportent aussi bien la polarisation simple (HH ou VV) que la double polarisation (VV + VH ou HH + HV).

7.2.1.1. Données IW-SLC

Le mode interférométrique (IW) capture trois sous-fauchées en utilisant l'observation du terrain avec balayage progressif RSO (*Terrain Observation with Progressive Scans SAR - TOPSAR*).

Les données complexes à visée simple (*Single Look Complex -SLC*) de niveau-1 sont focalisées, géoréférencées à l'aide des éphémérides (données d'orbite et d'attitude) du satellite. Les données SLC sont fournies dans la géométrie distance-temps (*slant-range*).

La distance-temps est la distance parcourue par l'onde électromagnétique entre le capteur actif et la cible, obtenue par le mesurage du temps de parcours (CILF 1997).

Les données IW-SLC contiennent une image par sous-fauchée, par canal de polarisation, pour un total de trois ou six images. Chaque image de sous-fauchée est constituée d'une série de *bursts*, chaque *burst* est une image SLC distincte, ce qui permettra de faciliter le traitement de ces données volumineuses (ESA 2013).

7.2.1.1.1. Cohérence interférométrique

Deux trains d'ondes de rayonnement ÉM sont cohérents lorsqu'ils sont en phase. Dans le radar, le terme cohérence est utilisé pour décrire des systèmes préservant la phase du signal reçu. La cohérence, lorsqu'elle est associée à l'interférométrie, est liée à la variance de phase entre deux images SAR.

La cohérence interférométrique fournit des informations sur la stabilité de la surface dans le temps, ou le changement temporel pendant la période comprise entre les acquisitions des deux images SAR. À cet égard, elle constitue un élément important pour la classification de l'occupation du sol.

La décorrélation temporelle est causée par des changements dans les propriétés physiques et géométriques des signaux rétrodiffusés pendant le temps d'acquisition de deux images SAR. Les types d'occupations du sol ont des propriétés physiques différentes, ce qui entraîne des caractéristiques de décorrélation temporelle différentes. La décorrélation est peut-être causée par des changements de la végétation, le gel et le dégel ou les activités humaines. Tous ces changements sont observés sur des périodes de quelques jours à quelques années, alors que certains changements à la surface de l'eau peuvent se produire en quelques millisecondes. Le terme décorrélation temporelle est un problème en particulier pour les zones de végétation ; en raison des processus phénologiques ou des activités agricoles, le signal peut être totalement décorrélé. Cependant, le signal provenant des zones urbaines et des montagnes dénudées (non boisées) peut conserver sa cohérence pendant de nombreuses années (ESA 2007; Luhega 2002; Soergel 2010; Ma et al. 2018).

Les images SAR interférométriques (InSAR) sont sensibles à la rugosité, à la forme et à la structure de la surface, ils peuvent donc fournir des informations verticales supplémentaires. Plusieurs études ont démontré que les images InSAR sont utiles pour quantifier les surfaces urbaines (Giri 2012).

7.2.2. Mission Sentinel-2

Sentinel-2 est une mission d'imagerie multispectrale conçue comme une constellation à deux satellites :

- Sentinel-2A a été lancé le 23 juin 2015.
- Sentinel-2B a été lancé le 7 mars 2017.

Les satellites identiques circulent sur une même orbite héliosynchrone avec une différence de phase orbitale de 180° , à une altitude de 786 km avec une inclinaison égale à $98,62^\circ$ et un temps d'acquisition à 10h30.

Cette mission est utile à la surveillance terrestre, la cartographie de l'occupation du sol, la classification, la cartographie du changement ainsi que l'évaluation précise des paramètres biogéophysiques. Sentinel-2 assure la continuité des données des missions telles que Landsat et SPOT.

Chacun des satellites Sentinel-2 porte une seule charge utile qui est l'imageur multispectral (*Multispectral Imager* - MSI) ; le MSI enregistre 13 bandes spectrales allant du visible et PIR au IRCL, avec une largeur de fauchée de 290 km.

Les caractéristiques de ce capteur sont :

- La résolution temporelle est de 10 jours réduite à 5 jours en cas de la constellation combinée et réduite encore à presque la moitié en raison du recouvrement entre les fauchés ou segments.
- La résolution spatiale dépend de la bande spectrale (voir annexe 9) :
 - Les bandes spectrales de 10 m : Bande 2, Bande 3, Bande 4 et Bande 8.
 - Les bandes spectrales de 20 m : Bande 5, Bande 6, Bande 7, Bande 8a, Bande 11 et Bande 12.
 - Les bandes spectrales de 60 m :Bande 1, Bande 9 et Bande 10.
- La résolution radiométrique de l'instrument MSI est de 12 bits.

7.2.2.1. Types de produits

- Niveau-1C (L-1C) :le produit L-1C est composé de tuiles de 100 km²(ortho-images en projection UTM/WGS-84). Les mesures radiométriques par pixel représentent des réflectances au sommet de l'atmosphère avec les paramètres pour les transformer en radiance. Les produits L-1C sont rééchantillonnés avec une résolution au sol (*Ground Sample Distance* -GSD) constante de 10, 20 et 60 m selon la résolution native des bandes spectrales.
- Niveau-2A (L-2A) :le produit L-2A fournit des images de réflectance au bas de l'atmosphère ou réflectance de surface (*Bottom Of Atmosphere* - BOA) dérivées des produits associés L-1C. Par conséquent, chaque produit L-2A est également composé de tuiles de 100 km² en géométrie cartographique (projection UTM/WGS-84). Les produits L-2A sont systématiquement générés sur le segment terrestre en Europe depuis mars 2018 et la production a été étendue au produit mondial en décembre 2018. La dérivation du niveau-2A peut également être réalisée par l'utilisateur via l'extension Sen2cor(ESA 2015).

Le Copernicus Open Access Hub fournit une politique d'accès gratuit et ouvert aux produits Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3 et Sentinel-5P. Les images sont distribués au format SAFE (*Standard Archive Format for Europe*) et peuvent être téléchargées à partir du site web du Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)(Open Access Hubs. d.).

La télédétection spatiale a été amplement utilisée pour l'inventaire des ressources naturelles. Grâce à la répétitivité d'acquisition, l'analyse des images multidates, c'est-à-dire des images saisies sur une même scène à des époques différentes, offre une dimension supplémentaire aux applications potentielles de la télédétection. Elle permet le suivi du changement de la surface terrestre et l'étude des phénomènes dynamiques qui affectent les écosystèmes. Les recherches dans ce domaine ont donné naissance à une nouvelle discipline : la télédétection du changement (Mas2000).

8. Télédétection du changement

La télédétection du changement est le processus qui consiste à identifier les différences dans une région en comparant ses images prises à différents moments (İlsever et Ünsalan 2012). Les applications sont nombreuses : analyse de l'occupation et de l'utilisation du sol, étude du développement de la végétation, détection du stress ou du changement phénologiques de la végétation, évaluation de la déforestation, évaluation des dommages, surveillance des catastrophes, suivi de la croissance urbaine, suivi de la modification de la ligne de rivage, analyse jour et nuit des caractéristiques thermiques et des autres changements environnementaux (Singh 1989; Mas 2000). Un grand nombre de ces analyses utilisent des images acquises à deux moments, connues sous le nom de télédétection du changement bitemporelle. Cependant, des séries temporelles d'images plus largement disponibles offrent la possibilité d'une télédétection du changement multitemporelle (Campbell et Wynne 2011).

Le principe de base de l'utilisation des images satellites pour la télédétection du changement est que les changements de l'occupation du sol se traduisent en variations de la radiance et que ces variations sont importantes en comparaison de celles causées par d'autres facteurs (Singh, 1989). Lors de la comparaison d'images multispectrales d'une scène donnée prises à différents moments, il est souhaitable de corriger autant que possible les intensités de pixels pour tenir compte de différences sans intérêt telles que celles dues à l'éclairement solaire ou à l'inclinaison solaire, aux conditions atmosphériques, à l'humidité du sol, à l'état phénologiques de la végétation ou à l'étalonnage du capteur (Canty 2014).

L'analyse des changements spectraux entre deux dates (ou plus), appelée télédétection du changement spectrale, est souvent préférée pour l'analyse de l'imagerie optique traditionnelle (plutôt que des données radar ou lidar). Que l'unité d'analyse soit un pixel, un voisinage, un segment multitemporel ou même (rarement) une classe spectrale, il est très important de suivre les étapes de prétraitement de l'image qui minimise le signal de variation, cela pourrait être confondu avec le signal d'intérêt de la détection de changement. Idéalement, cela signifie que les images comparées doivent être :

- Acquisées à partir de capteurs identiques ou bien interétalonnés et acquises à la même heure de la journée en utilisant le même champ de visée instantané (*Instantaneous Field Of View-IFOV*) et le même angle de visée ;
- Pour les analyses interannuelles, acquises au cours de la même saison afin de minimiser les différences dues aux changements phénologiques ;

- Mises en correspondance;

L'objectif de la mise en correspondance (*Image Co-registration*) est de garantir l'alignement spatial de deux ou plusieurs images d'une même scène, acquises par un même ou plusieurs instruments différents (optique visible ou infrarouge, radar, lidar) de sorte que toute caractéristique d'une image recouvre au mieux son empreinte dans toute autre image afin d'éviter les faux signaux résultant de pixels mal alignés. Ce processus s'effectue en sélectionnant une image comme référence (base/master) à laquelle toutes les autres images sont alignées. Une fois alignées, ces images peuvent être fusionnées (Canty 2014; Gomez-Chova et al. 2011).

- Sans nuages dans la zone d'analyse ;
- Corrigé à la réflectance au sommet de l'atmosphère ou de préférence la réflectance de surface (réflectance au bas de l'atmosphère).

Il est souvent difficile en pratique de satisfaire à toutes ces conditions, mais pour maximiser le signal effectif du changement auquel on s'intéresse, il faut minimiser le signal provenant de toute confusion (Campbell et Wynne 2011).

8.1. Télédétection du changement bitemporelle

La télédétection du changement bitemporelle permet de comparer l'occupation du sol d'une même zone, sur une échelle de temps en deux points (Giri 2012).

Les méthodes et les techniques de télédétection du changement bitemporelle peuvent être classées comme suit :

- Photo-interprétation basée sur l'appréciation visuelle ;
- Méthodes préclassificatoires (Accentuation d'images) :
 - Méthodes basées sur des opérations ponctuelles : algorithmes de traitement des images (*Map algebra*) ;
 - Méthodes basées sur la transformation globale de l'image : transformation et réduction des données ;
- Classification d'images ;
- Comparaison de classifications (Méthode post-classificatoire) (Campbell et Wynne 2011; Mas 2000).

8.1.1. Méthode de photo-interprétation

La comparaison d'images à deux dates est le premier point de départ ; elle s'effectue facilement en utilisant l'une des trois techniques de base. Dans la première, connue sous le nom « *multidate color image composite* », deux images appropriées calibrées radiométriquement et mises en correspondance sont composées (i.e. dans lesquelles les bandes spectrales des deux dates sont empilées pour former une seule image), puis les bandes spectrales de différentes dates sont choisies pour l'affichage afin de mettre en évidence le changement d'intérêt.

Dans le second cas, les images sont affichées l'une sur l'autre. Les outils couramment disponibles dans la plupart des logiciels de traitement d'images peuvent ensuite être utilisés pour visualiser les changements, notamment en glissant une image sur une autre horizontalement ou verticalement ou en scintillant les images.

La troisième technique consiste simplement à afficher côte à côte des images mises en correspondance et géo-liées, en utilisant les outils d'enquête typiques tels que le panoramique (*Pan*), le zoom et le curseur pour une analyse ciblée. Dans ce dernier cas, la digitalisation est souvent utilisée pour identifier et classer les changements entre les images. Dans certains cas, un échantillon de points est interprété. Dans les deux cas, cependant, l'analyste peut utiliser des éléments d'interprétation d'image autres que la tonalité chromatique (*Hue*), associés à la connaissance du domaine d'application. Il est à noter que l'un des principaux objectifs de l'interprétation visuelle est souvent d'aider à choisir les meilleures techniques de détection des changements en fonction des objectifs de l'analyse (Campbell et Wynne 2011).

8.1.2. Méthodes préclassificatoires

Ces méthodes consistent à mettre en valeur les changements radiométriques entre deux images acquises à des dates différentes. Les données multitudes sont transformées afin de rendre l'information sur les changements plus facile à extraire. Les méthodes d'accentuation d'images font appel à des opérations ponctuelles (i.e. opérations pixel à pixel dans lesquelles la valeur du pixel X'_{ij} dans l'image finale ne dépend que de la valeur du même pixel X_{ij} dans l'image initiale) ou globales (i.e. transformations qui prennent en compte toute l'image). En général, deux images à des dates différentes sont transformées en une image non classée nécessaire à l'extraction de l'information sur les changements. Cette analyse ne permet pas en général de déterminer la nature des changements (Mas 2000).

8.1.2.1. Méthodes basées sur des opérations ponctuelles

Les opérations arithmétiques sont appliquées aux pixels correspondants dans chaque image, l'image de changement étant formée à partir des valeurs obtenues.

8.1.2.1.1. Différence d'images

Cette technique consiste à soustraire, pixel par pixel, une image ancienne d'une image récente, afin de produire une nouvelle image dite résiduelle mettant en valeur les changements entre les deux dates selon la formule suivante :

Équation 1. Différence d'images

$$Dx_{ij} = x_{ij}(t_2) - x_{ij}(t_1) + k \quad (1)$$

Avec D_{xij} , la valeur radiométrique du pixel dans la bande spectrale x de la nouvelle image, x_{ij} , la valeur radiométrique du pixel dans la bande spectrale x (où les deux bandes spectrales (x) ont idéalement la même résolution spectrale); i et j , les coordonnées du pixel (lignes, colonnes) ; t_1 : première date; t_2 : deuxième date; K , constante ajoutée pour que le résultat soit positif (les valeurs de la nouvelle image peuvent ensuite être multipliées par une constante afin d'appartenir à un intervalle adéquat, comme [0-255] si l'image est codée sur huit bits). L'image issue de la soustraction (résiduelle) présente donc des pixels dont les valeurs sont proportionnelles à l'écart de la luminance enregistrée lors de l'acquisition des deux images. Cette procédure donne une distribution de différence pour chaque bande spectrale.

En général, si les pixels invariants occupent plus d'espace que les pixels ayant subi des changements, la distribution de la valeur des pixels de l'image résiduelle est une distribution normale. Les pixels qui ne présentent pas de changement de leurs valeurs radiométriques tendent à être groupées autour de la moyenne tandis que ceux qui correspondent à un changement se retrouvent aux extrémités de l'histogramme (Singh 1989; Mas 2000) ; c'est-à-dire les valeurs positives et négatives représentent le changement dans deux directions différentes, et les valeurs autour de zéro ne représentent aucun changement.

Il est à noter que la différence d'images (soustraction d'images) peut être effectuée soit en utilisant les images originales ou leurs images dérivées (e.g., les indices spectraux) (Giri 2012).

Les indices spectraux sont des combinaisons arithmétiques ou des transformations ponctuelles des bandes spectrales basées sur l'observation des signatures spectrales. Ils combinent la réflectance spectrale de deux ou plusieurs bandes spectrales qui indiquent la présence ou l'abondance relative des caractéristiques d'intérêt (e.g., végétation, sol nu, sol artificialisé, etc.). Les indices accentuent les caractéristiques d'intérêt afin qu'elles apparaissent distinctes d'autres caractéristiques de l'image. Les indices de végétation sont les plus courants, mais d'autres indices sont disponibles pour les zones brûlées, les caractéristiques urbaines (bâti, routes, etc.), l'eau et les caractéristiques géologiques, etc. (Hanna 2019; L3Harris Geospatial s. d.).

Les indices spectraux sont largement utilisés pour les études des changements de l'occupation du sol. Ils peuvent réduire le volume de données à traiter et à analyser et fournir des informations combinées qui sont plus fortement liées aux changements de la scène que les bandes spectrales de l'image originelle (Giri 2012).

La soustraction bitemporelle d'un indice spectral (différence d'indice spectral) a été appliquée dans cette étude en raison de sa simplicité et de son efficacité. Les indices utilisés sont choisis en fonction du phénomène étudié qui est l'artificialisation des sols. Ils sont détaillés dans ce qui suit :

- NDVI

L'indice de végétation par différence normalisée (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) est calculé sur la base du rapport de la différence des bandes spectrales proche infrarouge (PIR) et rouge (R) et de leur somme (Rouse et Haas 1974; Tucker 1979). Son expression est la suivante :

Équation 2. NDVI

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad (2)$$

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles les réflectances dans le rouge sont supérieures à celles du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0.

Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 ; les valeurs les plus élevées correspondent aux couverts les plus denses (Anselme et Gadal 2008). Les valeurs NDVI sont fortement corrélées avec la végétation verte ; le NDVI diminue considérablement après l'élimination de la biomasse verte. Il est donc largement utilisé pour la cartographie et la surveillance des perturbations causées par le feu (incendie), la coupe à blanc des forêts, l'urbanisation (artificialisation) et d'autres changements de l'occupation du sol (Giri 2012).

La soustraction du NDVI est implémentée dans les outils de détection de changement « Esri, Inc., ChangeMatters » et « Harris Geospatial Solutions, Inc., ENVI Change Detection – Subtractive » (Jensen et al. 2012).

- EBBI

L'EBBI est un acronyme pour *Enhanced Built-Up and Bareness Index* la désignation française est l'indice de développement et de nudité (Doumit et Sakr 2015). L'EBBI est calculé en utilisant la formule suivante :

Équation 3. EBBI

$$EBBI = \frac{IRCL - PIR}{10\sqrt{IRCL + IRT}} \quad (3)$$

L'EBBI est appliqué sur les bandes spectrales du proche infra-rouge (PIR), de l'infrarouge de courte longueur d'onde (IRCL) et de l'infrarouge thermique (IRT). Les bandes PIR et IRCL sont associées à un niveau de contraste élevé pour la détection des sols artificialisés (bâties et revêtus) et des sols nus. Dans ces bandes, il existe un rapport de réflectance inverse en ce qui concerne la détection des sols artificialisés et des sols nus par rapport à la végétation. La végétation a une réflectance élevée dans la bande PIR, mais la réflectance des sols artificialisés et des sols nus dans la bande PIR est faible. La soustraction de la bande PIR de la bande IRCL aura pour résultat des valeurs positives pour les pixels correspondant aux sols artificialisés et aux sols nus, et des valeurs négatives pour la végétation.

De plus, une addition de la bande IRCL et de la bande IRT donnera des valeurs de pixels plus élevées pour les sols artificialisés et les sols nus que pour la végétation. Le rapport entre la soustraction de la bande PIR de la bande IRCL et la sommation de la bande IRCL et de la bande IRT donnera pratiquement une valeur de zéro pour les pixels correspondant à l'eau, ainsi que des

valeurs négatives pour la végétation et des valeurs positives pour les pixels correspondant aux sols artificialisés et aux sols nus.

Les canaux IRT peut distinguer les niveaux élevés et faibles d'albédo dans les terrains bâtis ou artificialisés(en ang. *Built-up land*). En effet, l'utilisation des canaux IRT est très efficace pour la cartographie des sols artificialisés sur la base d'un faible albédo, ce qui élimine l'effet des ombres et de l'eau, tandis qu'un albédo élevé montre clairement les sols artificialisés et les sols nus. Le canal IRT présente également un contraste élevé pour la végétation. La température d'un sol artificialisé est de 10 à 12 degrés plus élevée que celle de la végétation.

Par conséquent, la combinaison des longueurs d'onde PIR, IRCLet IRT permet d'améliorer la méthode de la cartographie des sols artificialisés et des sols nus par rapport aux indices de télédétection précédemment existants.

La cartographie des sols artificialisés et des sols nus dans les zones urbaines est importante car l'existence de ces types de terrains peut être utilisée comme indicateur du développement urbain (As-syakur et al. 2012).

8.1.2.1.2. Division d'images

Cette technique consiste à créer une image-ratio en divisant, pixel à pixel, deux bandes spectrales identiques prises à deux dates différentes :

Équation 4. Division d'images

$$Rx_{ij} = x_{ij}(t_2)/x_{ij}(t_1) \quad (4)$$

Ou Rx_{ij} est la valeur radiométrique du pixel dans la bande x de l'image-ratio ; $x_{ij}(t_n)$, la valeur radiométrique du pixel dans la bande spectrale x au temps t_n , à la ligne i et à la colonne j. L'image obtenue lors de la division des bandes représente le rapport de la luminance des objets aux deux dates. Si les valeurs radiométriques sont semblables dans chaque bande, le quotient Rx sera proche de 1, ce qui indique l'absence de changement (Singh 1989; Mas 2000).

8.1.2.1.3. Analyse par vecteur de changement

Cette technique a été développée pour détecter les changements du couvert forestier. Elle consiste à mettre en valeur les variations radiométriques à l'aide d'un modèle qui fait appel à b variables spectrales mesurées à deux dates différentes, Ces variables constituent les composantes d'un vecteur, appelé « vecteur spectral de détection de changement », qui décrit la direction et l'amplitude du changement entre les deux dates. Son amplitude caractérise l'importance du changement et sa direction contient des informations sur le type de changement. Cette technique, appliquée à l'analyse d'une image multodate de dimension b produit une bande représentant l'amplitude du vecteur (i.e. calculée comme la distance euclidienne dans l'espace de b dimensions) et (b-1) bandes qui représentent les angles qui définissent la direction du vecteur. La technique des vecteurs spectraux de changement est semblable à la différence d'images en offrant en plus une ou plusieurs bandes permettant de caractériser la nature du changement. Dans la pratique, les vecteurs de changement sont très nombreux et leur analyse en vue de déterminer le type de changement est complexe (nécessitant une bibliothèque spectrale spécifique au objet de la région, qui n'est pas disponible dans notre pays) (Singh 1989; Mas 2000).

8.1.2.2. Méthodes basées sur la transformation globale de l'image

Il existe diverses techniques permettant de transformer les données de l'image d'origine en de nouveaux axes composés de combinaisons linéaires des bandes existantes. Les plus utilisées sont l'analyse en composantes principales (ACP) et transformation « Tasseled Cap ».

8.1.2.2.1. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse multivariée qui sert, en télédétection, à réduire le nombre de composantes spectrales pour ne garder que les composantes principales qui rendent compte au mieux de la variance des images multispectrales originelles. L'ACP est en général appliquée à une image de dimension $2b$ (image composite ou *layerstack* en anglais), résultat de l'empilement des deux images de b dimensions (Date 1 et Date 2). L'ACP calcule la matrice de variance-covariance associée aux n bandes de l'image composite (donnant une ACP non-normalisée) ou la matrice de corrélation associée aux n bandes de l'image composite (donnant une ACP normalisée).

L'ACP détermine un nouvel ensemble d'axes orthogonaux qui ont leur origine à la moyenne des données et qui sont pivotés de manière à maximiser la variance des données. Les résultats d'une ACP sont représentés comme un ensemble non corrélé de n images decomposants qui représentent des quantités de variance de plus en plus petites.

L'ACP sélective est réalisée à partir de deux bandes au lieu de toutes. En analyse multidate, elle met en œuvre la même bande spectrale pour deux dates différentes. L'information commune aux deux dates se retrouve dans la première composante tandis que l'information unique est isolée dans la seconde. Les images de composants de sortie (en anglais *output component images*) peuvent être analysées en utilisant une approche commune qui consiste à sélectionner et à analyser uniquement la composante ACP (i.e. la bande) contenant la plupart des informations importantes sur le changement. La première ou les deux premières images ACP générées à partir de l'image composite multidate tendent à rendre compte de la variation des données d'image qui n'est pas due à un changement d'occupation du sol. Celles-ci sont appelées composantes stables. Lorsque toutes les bandes spectrales sont utilisées, les informations du changement se trouvent souvent dans la troisième ou la quatrième bande ACP, mais elles varient en fonction du contenu de la scène multidate et de la quantité de changement présente entre les deux images. Les bandes ACP contenant les informations du changement de l'occupation du sol sont appelées « composantes du changement ». La difficulté survient lorsque l'on essaie d'identifier la composante du changement idéale et d'extraire les informations du changement (Jensen et al. 2012)(Mas 2000).

8.1.2.2.2. Transformation « Tasseled Cap »

Comme l'ACP, la transformation « Tasseled Cap » vise à obtenir de nouvelles bandes, par combinaison linéaire des bandes spectrales originelles, afin d'accentuer certaines caractéristiques

de l'image. Cette technique, développée par la NASA et le département d'agriculture nord-américain (USDA) à partir d'images Landsat MSS afin de prédire les récoltes, permet l'obtention de quatre composantes directement interprétables (indices de verdure, de luminance du sol, de jaunissement et indice inaffecté). Des travaux sur son application aux images Landsat TM ont montré l'existence d'une nouvelle composante, la composante d'humidité, étroitement liée à l'information dans l'infrarouge moyen. L'analyse peut alors se poursuivre en utilisant une ou plusieurs des techniques mentionnées précédemment (Mas 2000).

8.1.3. Méthode de classification d'images

La classification a pour but de rassembler les pixels en classes devant contenir les objets recherchés. Le critère de groupement est la similitude radiométrique. En analyse de données multitudes, la classification vise à regrouper des surfaces qui présentent la même évolution de leurs caractéristiques radiométriques dans le temps. Elle est souvent sous-utilisée dans la télédétection du changement spectral, mais elle est extrêmement puissante, seule ou en combinaison avec d'autres techniques précédemment discutées. L'intérêt de son utilisation est qu'elle détecte le changement, mais aussi permet de l'attribuer. Par exemple, nous pourrions vouloir savoir non seulement s'il y a une perte de couverture forestière mais aussi, si oui, si la forêt perdue est devenue un pâturage, une mine à ciel ouvert ou un développement suburbain. La classification peut se faire en utilisant l'ensemble de la zone d'intérêt, ou elle peut être utilisée uniquement pour attribuer un changement une fois que les zones dans lesquelles le changement s'est produit ont été identifiées à l'aide d'une autre technique (Campbell et Wynne 2011; Mas 2000).

8.1.3.1. Techniques de classification d'images

Diverses approches de classification ont été développées et largement utilisées pour produire des cartes d'occupation du sol (Aplin et Atkinson 2004). On parle de classification supervisée et non supervisée ; paramétrique, non paramétrique et non métrique, ou de classification logique floue (*fuzzy*), ou par-pixel, sous-pixel et classification pré-champs (Keuchel et al. 2003; Jensen 2005). Cependant, il existe deux types de classification : classification supervisée et non-supervisée (Richards et Jia 2006).

8.1.3.1.1. Classification d'images non-supervisée

La classification d'images non-supervisée consiste à séparer les pixels inconnus d'une image en fonction de leurs valeurs radiométriques en classes ou en partition (*clusters*) sans aucune indication de la part de l'analyste (Tou et Gonzalez 1974). Deux méthodes de classification non-supervisée sont utilisées : l'algorithme des nuées dynamiques ou des centres mobiles (*K-means*) et l'algorithme dit « *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique - ISODATA* ». Ces deux méthodes reposent uniquement sur des statistiques spectrales à l'échelle du pixel (*Spectrally Pixel-Based Statistics*) et n'intègrent aucune connaissance préalable des caractéristiques des thèmes étudiés (Al-doski et al. 2013).

8.1.3.1.2. Classification d'images supervisée

La classification supervisée est une méthode dans laquelle l'analyste définit sur l'image de petites zones d'intérêts appelées données d'entraînement ou d'apprentissage, qui contiennent les variables de prédiction mesurées dans chaque unité d'échantillonnage, et attribue au préalable des classes aux unités d'échantillonnage (Černá et Chytrý 2005). La délimitation de données d'entraînement représentatives d'un type d'occupation du sol est efficace lorsqu'un imagiste (*image analyst*) connaît la géographie d'une région et possède une expérience avec les propriétés spectrales des différentes classes d'occupation du sol (Al-doski et al. 2013). Les propriétés spectrales des zones d'intérêts sont utilisées pour entraîner l'algorithme de classification, dans lequel la signature spectrale de chaque pixel est adaptée aux signatures d'entraînement qui appartiennent aux différentes classes et l'image est classée en conséquence (Richards 2013; Schmidt et McCullum 2018).

Il existe divers algorithmes pour la classification supervisée, et le choix de l'algorithme peut affecter les résultats. Les plus largement utilisés sont : la classification du maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Classification-MLC*) et l'algorithme de forêts d'arbres décisionnels (ou forêts aléatoires de l'anglais *random forest classifier*). Chaque méthode détermine différentes manières de définir les classes en fonction de leurs statistiques (Schmidt et McCullum 2018). Les techniques de classification à un seul niveau tel que le maximum de vraisemblance prennent une seule décision sur un pixel pour l'étiqueter comme appartenant à l'une des classes disponibles ou le laisser non classé, tandis que les techniques de classification à plusieurs niveaux, telles que l'algorithme de forêts aléatoires, elles s'appuient sur une série de décisions pour déterminer l'étiquette la plus appropriée d'un pixel (Richards 2013).

8.1.3.1.2.1. Forêts aléatoires

L'algorithme de forêts aléatoires (*random forests*) crée un ensemble d'arbres de décision afin de réduire l'erreur de biais et d'assurer une faible corrélation entre les arbres. Les arbres sont construits sans élagage pour assurer un faible biais. Un arbre de la forêt est construit à partir d'un échantillon « *bootstrap* » tiré avec remise depuis l'ensemble d'apprentissage et la recherche de la meilleure coupe est fondée sur un sous-ensemble d'attributs tiré aléatoirement. Ces deux dernières propositions ont pour objectif de maintenir à un bas niveau de la corrélation entre les arbres afin d'assurer leur diversité. Considérons une tâche de classification de m individus x_i ($i = 1, m$) et n attributs. Un arbre de décision (noté DT) dans la forêt de k arbres (noté $RF = \{DT_i\}_{i=1, k}$) est créé de la façon suivante :

- Tirage avec remise depuis l'ensemble d'apprentissage d'un échantillon bootstrap (noté B_i ($i = 1, k$)) qui est utilisé pour la construction de l'arbre ;
- Recherche d'une meilleure coupe pour chaque nœud de décision à partir d'un sous-ensemble aléatoire de n_0 attributs ($n_0 < n$, e.g. $n_0 = pn$) ;
- Construction de l'arbre le plus profond possible (sans élagage).

Pour prédire l'étiquette d'un nouvel individu, l'algorithme utilise un vote majoritaire des arbres de la forêt dans le cas de la classification ou la moyenne des prédictions des arbres dans le cas d'une régression. Breiman a aussi proposé d'utiliser les individus en dehors de l'échantillon bootstrap (environ 36, 8%) pour estimer les attributs importants et l'erreur de la forêt une fois

l'arbre courant construit. L'algorithme de forêts aléatoires donne de bons résultats. Par ailleurs, il est rapide et robuste face aux données (Breiman 2001)(Do et al. 2009).

De manière plus simple, l'algorithme de forêts aléatoires utilise un ensemble aléatoire des sites d'entraînement (généralement les deux tiers) et crée plusieurs arbres de décision. Le tiers restant ($\sim 1/3$) est utilisé pour estimer l'erreur et l'importance de chaque variable prédictive. Comme il est puissant et largement utilisé dans les applications de la télédétection, il a aussi des limites ; l'algorithme ne pouvant pas prédire la plage spectrale au-delà des données d'apprentissage, les données d'entraînement doivent donc capturer l'intégralité de la plage spectrale (i.e. les sites d'entraînement doivent être répartis sur toute l'ensemble de la scène) (Schmidt et McCullum 2018).

8.1.4. Comparaison de classifications

Basée sur la comparaison d'images de dates différentes d'une même scène, classées indépendamment, cette méthode, très couramment utilisée pour détecter les changements de l'occupation du sol, rend compte de la nature des changements. La méthode post-classificatoire présente de nombreux avantages. Elle permet d'intégrer des données de natures différentes et d'obtenir directement la nature des changements. La qualité des résultats dépend de la précision de chacune des classifications et de la mise en correspondance des images. Une estimation de la qualité de l'image de changement est obtenue en effectuant le produit de la précision de chacune des classifications. S'il y a plus de deux classes thématiques, une erreur de classification dans une des deux images a une plus grande probabilité de faire apparaître un faux changement (classes différentes dans les deux images) que d'occulter un vrai changement (classes identiques dans les deux images). Certains auteurs rapportent que cette méthode donne des résultats médiocres. Cependant, elle a été appliquée dans de nombreuses études (Mas 2000).

La télédétection est souvent combinée à d'autres technologies géospatiales telles que les SIG (Système d'Information Géographique) et le GPS (*Global Positioning System*) (Weng 2012).

Les SIG fournissent un environnement flexible pour l'acquisition, la modélisation, l'analyse, la gestion et l'affichage de données géospatiales provenant de diverses sources afin de sortir avec des informations utiles à la décision.

9. Système d'information géographique

Un SIG est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnels capables de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées (De Blomac et al. 1994). Les logiciels SIG exécutent une gamme de traitement de données, notamment la saisie, le stockage, l'extraction et la sortie de données, en plus d'une grande variété de fonctions descriptives et analytiques. Le squelette de la fonction analytique du SIG est la superposition de couches de données géo-référencées. Chaque couche décrit une propriété géographique unique dans une zone géographique délimitée, telle que l'élévation, l'utilisation du sol, l'occupation du

sol, le réseau de transport, les rivières, les vallées, le trait de côte, etc. La superposition SIG permet de délimiter les relations spatiales entre ces couches de données.

Dans le SIG, les modèles de données fournissent des règles pour convertir les variations géographiques réelles en objets discrets. En règle générale, il existe deux types principaux de modèle de données : le raster et le vecteur.

Un modèle raster divise la zone d'étude en une grille régulière de cellules où chaque cellule (pixel) contient une valeur unique décrivant une caractéristique unique dans une zone géographique délimitée. Les données raster sont à titre d'exemple, les données sur l'utilisation du sol et l'occupation du sol, les modèles numériques de terrain (MNT) de diverses résolutions spatiales, orthoimage numérique et le DRG (*Digital Raster Graphic*). Étant donné que la télédétection génère des images au format raster, ces dernières peuvent également être traitées dans un environnement de SIG.

Les capacités analytiques d'un SIG raster résultent directement de l'application des statistiques traditionnelles et de l'algèbre pour traiter les données spatiales.

Le modèle de données vectorielles traditionnel est basé sur les primitifs de la géométrie euclidienne à savoir, les points, les lignes et les polygones. Le modèle vectoriel topologique plus avancé, basé sur la théorie des graphes, code les entités géographiques à l'aide de nœuds, d'arcs et de points libellés.

La création d'une base de données à SIG vecteur comporte principalement trois étapes dans l'ordre : la saisie de données géospatiales, entrée de données d'attributs et la liaison des données spatiales et des données d'attributs. Les données géospatiales sont acquises à partir de fichiers texte, ou de données numériques, de cartes scannées géoréférencées et vectorisées ou directement à partir de bases de données en ligne à libre accès (e.g., les données *OpenStreetMap*). Les attributs sont les données alphanumériques qui décrivent les entités géospatiales. Ils peuvent être entrés manuellement ou importés à partir de tableurs ou bases de données numériques.

Les capacités analytiques d'un SIG vecteur ne sont pas les mêmes que celles d'un SIG raster. Il y a plus d'opérations sur les objets, et les mesures telles que la superficie doivent être calculées à partir des coordonnées des objets, au lieu de compter les cellules. Les fonctions analytiques peuvent être regroupées en fonctions topologiques et non-topologiques. La première comprend la mise en tampon (*Buffer*), la superposition, l'analyse de réseau et d'autres fonctions, tandis que la dernière implique les requêtes attributaires, le géocodage d'adresses, le calcul de surface et le calcul statistique (Weng 2012).

La plupart des logiciels SIG sont de type propriétaire, à sources fermées et assez coûteux, ils préfèrent de fonctionner avec des données dans des formats propriétaires. Il existe également des logiciels SIG de type libre et à sources ouvertes. Certains formats SIG ont gagné un appui massif notamment le format shapefile d'ESRI et les bases de données PostGIS. En effet, ces derniers (i.e., Shapefiles et PostGIS) peuvent être créés et remplis avec des données OpenStreetMap. L'interopérabilité des logiciels SIG permet l'exploitation de divers formats de données à travers les utilitaires de conversion de plus en plus performant (OSM Wiki contributors 2009).

10. OpenStreetMap

OpenStreetMap(OSM) est un projet de cartographie initié par Steve Coast de l'UCL (University College de Londres) (Haklay et Weber 2008) en juillet 2004 pour mettre en œuvre une base de données géographique mondiale à licence libre, en utilisant le système GPS et d'autres données libres. La licence OpenStreetMap permet un accès gratuit (ou presque) à leurs données cartographiques. OSM offre également la possibilité d'éditer leurs cartes à l'aide de l'éditeur en ligne « iD » ou du logiciel JOSM(OSM Wiki contributors 2005).

Chapitre II

Contexte général de la zone d'étude

1. Contexte général du littoral algérien

Le littoral est un espace géographique qui ne se laisse pas enfermer dans une définition simple. Zone vulnérable et en constante évolution. Lieu d'une intense activité humaine, il est souvent l'enjeu de convoitises économiques qu'ont tenté d'endiguer des réglementations et des lois, comme la loi Littoral en Algérie. Autrement dit, le littoral a des dimensions géographiques, juridiques, scientifiques, économiques et politiques que l'on ne peut pas ignorer (Merckelbagh 2009).

Le littoral algérien s'étend sur un linéaire côtier de près de 1622 km, de Marsat-Ben-M'hidi à l'ouest (Wilaya de Telemcen) jusqu'au Cap roux à l'est (Wilaya d'El Tarf). Il se distingue par des paysages très diversifiés et très riches (plages, falaises, massifs forestiers, parcs naturels, etc.). L'environnement côtier de l'Algérie a subi de grandes perturbations telles que l'intensification de la pollution, l'érosion côtière, la dégradation des sites, l'extension du bâti au détriment du foncier agricole, etc. (Grimes 2018).

Jusqu'aux années 1980, l'urbanisation du littoral algérien se limitait à l'extension des villes côtières existantes et à l'émergence de rares nouveaux organismes urbains. Depuis, des espaces littoraux, occupés initialement par quelques résidences estivales ou secondaires, accueillent de nombreux projets immobiliers et touristiques, réalisés dans la perspective du désengorgement des villes, souvent les plus importantes du pays (grandes villes) (Ghodhani et Semmoud 2010). En raison de la forte concentration démographique sur le littoral algérien, le taux d'urbanisation est passé de 26% en 1962 à 59,4% en 1998. Cette urbanisation s'est développée au détriment du foncier agricole, les surfaces concédées par l'agriculture ont été évaluées à 8790 hectares à la Mitidja, 2850 hectares dans les collines du Sahel, 1010 hectares dans les plateaux côtiers du centre et 5470 hectares dans la région oranaise. A elles seules ces régions littorales autour des trois principales villes côtières ont perdu 17% du total de leurs terres agricoles. Les sites naturels (plages, dunes, etc.) autour des grandes agglomérations et périmètres industriels côtiers (Alger, Oran, Annaba, etc.) n'ont pas été épargnés non plus (Kacemi 2011).

1.1. Pression sur le littoral

1.1.1. Population

Les wilayas du littoral sont caractérisées par un très fort indice de concentration de la population. En effet, l'existence des terres agricoles les plus fertiles, des infrastructures de transport et de communication, ainsi que toutes les commodités nécessaires à l'activité industrielle ne font qu'accroître cette concentration de la population sur la bande littorale, la population des wilayas du littoral passe de 10,2 Millions en 1987 à 12,6 Millions puis à 14,5 Millions respectivement en 1998 et 2008. En 2020 cette population est estimée à 15,5 Millions de personnes. Par ailleurs, la densité de population au niveau national est passée de 12,22 à 14,3 habitants au km² entre 1998 et 2008, alors que sur la bande littorale elle est passée de 244,5 à 274 habitants au km² durant la même période. Cette densité moyenne au niveau du littoral cache aussi des disparités énormes dont la wilaya d'Annaba a la densité la plus élevée dans la région Est du pays avec 423,56 hab/km² en 2008 contre 387,64 hab/km² en 1998 (ONS 2015).

1.1.2. Activités économiques

La région littorale constitue un pôle attractif pour la localisation et le développement des différentes activités économiques notamment les activités industrielles. Sur le territoire national, 934250 entités économiques ont été dénombrées durant le premier recensement économique effectué en 2011. Plus de 46% de ces entités sont localisées dans la zone littorale, la wilaya d'Annaba enregistre une concentration de 2.10% de l'ensemble des entités économiques du pays(ONS 2015).

1.2. Législation au niveau national

Le désir de maîtriser la gestion des espaces littoraux en Algérie est récent, la loi 90-29 du 1^{er} décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme est le premier texte ayant défini en « dispositions particulières à certaines parties du territoire » l'espace littoral. Les dispositions de ce texte s'appliquent à toutes les îles, îlots ainsi qu'une bande de terre d'une largeur minimale de 800 mètres longeant la mer et incluant l'intégralité des zones humides et leurs rivages sur 300 mètres de largeur dès qu'une partie de ces zones est en littoral tel que défini. En outre, toute construction sur une bande de terre de 100 mètres de largeur à partir du rivage est frappée de servitude de non ædificandi (non-autorisée), toutefois sont autorisées sur cette bande les constructions nécessitant la proximité immédiate de l'eau « art. 45 de la loi 90-29 ».

Les dispositions de cette loi n'ont pas empêché l'urbanisation de s'étendre dans les zones proches du rivage. Ces espaces connaissent également une dégradation importante due à l'extraction non autorisée du sable et à la fréquentation anarchique des plages. Ce n'est qu'en février 2002 qu'une loi spécifique au « littoral » a été promulguée. Il s'agit de la loi 02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral. Cette loi délimite trois bandes dans le littoral tel que défini à l'article (07), dans lesquelles sont édictées des restrictions relatives à l'urbanisation (voir annexe 10).

- Bande 1 : Il s'agit de la bande inconstructible dont la largeur peut atteindre 300 mètres à partir du rivage pour des motifs liés au caractère sensible du milieu côtier. Cette bande inclut le rivage naturel dans lequel sont interdits la circulation et le stationnement des véhicules (sauf les véhicules de service, de sécurité, de secours, d'entretien ou de nettoyage des plages).
- Bande 2 : D'une largeur de 800 mètres où sont interdites les voies carrossables nouvelles parallèles au rivage (alinéa 1 de l'article 16). Toutefois, en raison de contraintes topographiques de configuration des lieux ou de besoins des activités exigeant la proximité immédiate de la mer, il peut être fait exception à cette disposition.
- Bande 3 : Dont la largeur est de trois kilomètres, dans cette bande sont interdites :
 - Toute extension longitudinale du périmètre urbanisé ;
 - L'extension de deux agglomérations adjacentes situées sur le littoral à moins que la distance les séparant soit de 5 kilomètres au moins ;
 - Les voies de transit nouvelles parallèles au rivage.

Les constructions et les occupations du sol directement liées aux fonctions des activités économiques autorisées par les instruments d'urbanisme dans la bande des trois kilomètres sont réglementées (Kacemi 2009).

2. Présentation et description de la zone d'étude

2.1. Localisation géographique

La wilaya d'Annaba se confond plus particulièrement avec son chef-lieu (ville d'Annaba) en tant que la 3^{ème} métropole littorale du pays. Elle est située au nord-est du pays, elle occupe une position stratégique, faisant face à la mer méditerranéenne sur un linéaire côtier de 122.5 km (MATET 2008). Sa superficie est de 1.393 km² (voir 1439 km², 1412 km² et 1420 km² selon d'autres sources) (Laouar et Mazouz 2017). Son territoire est localisé entre les latitudes ; 37° 5' Nord, 36° 36' Nord et les longitudes ; 7° 17' Est, 7° 49' Est. Elle est limitée géographiquement par :

- La mer Méditerranée, au nord ;
- La wilaya de Guelma, au sud ;
- La wilaya d'El-Taref, à l'est ;
- La wilaya de Skikda, à l'ouest.

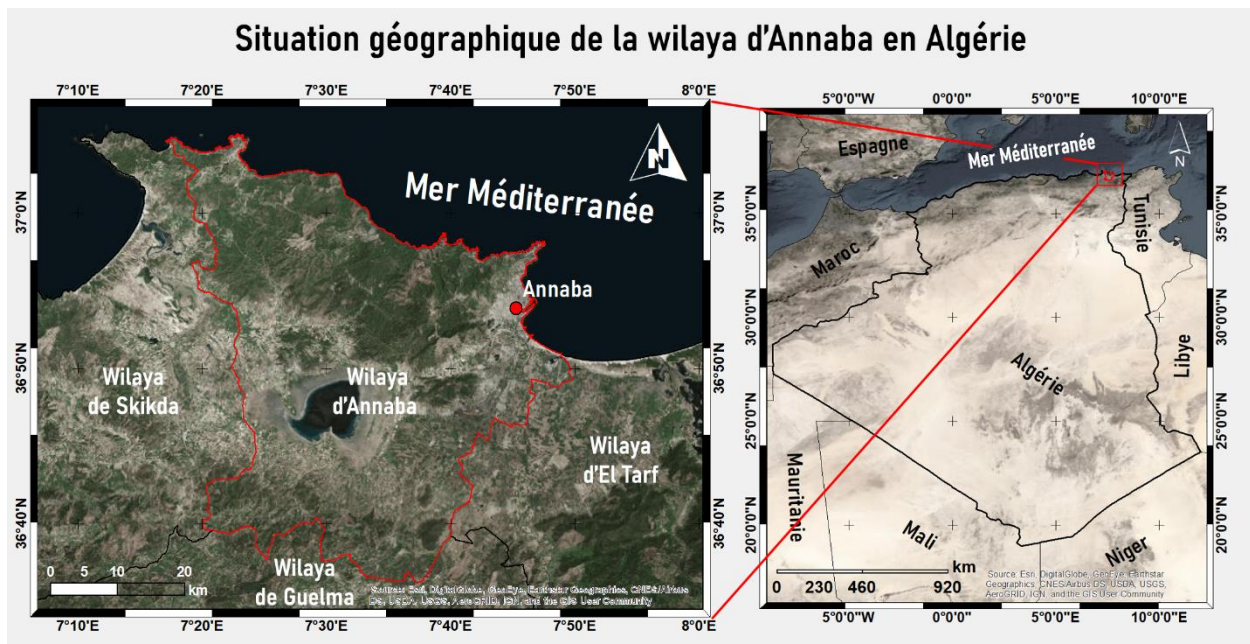


Figure 1. Situation géographique de la wilaya d'Annaba en Algérie

2.2. Relief et hydrographie

Le relief de la wilaya d'Annaba est constitué principalement de montagnes, de collines et de plaines¹. L'élévation du terrain varie de 0 à 1004 mètres (Fig. 2). Dans la partie nord, le relief montagneux est presque prédominant tandis que, les plaines sont prédominantes notamment sur la partie Est, le centre et l'ouest du territoire.

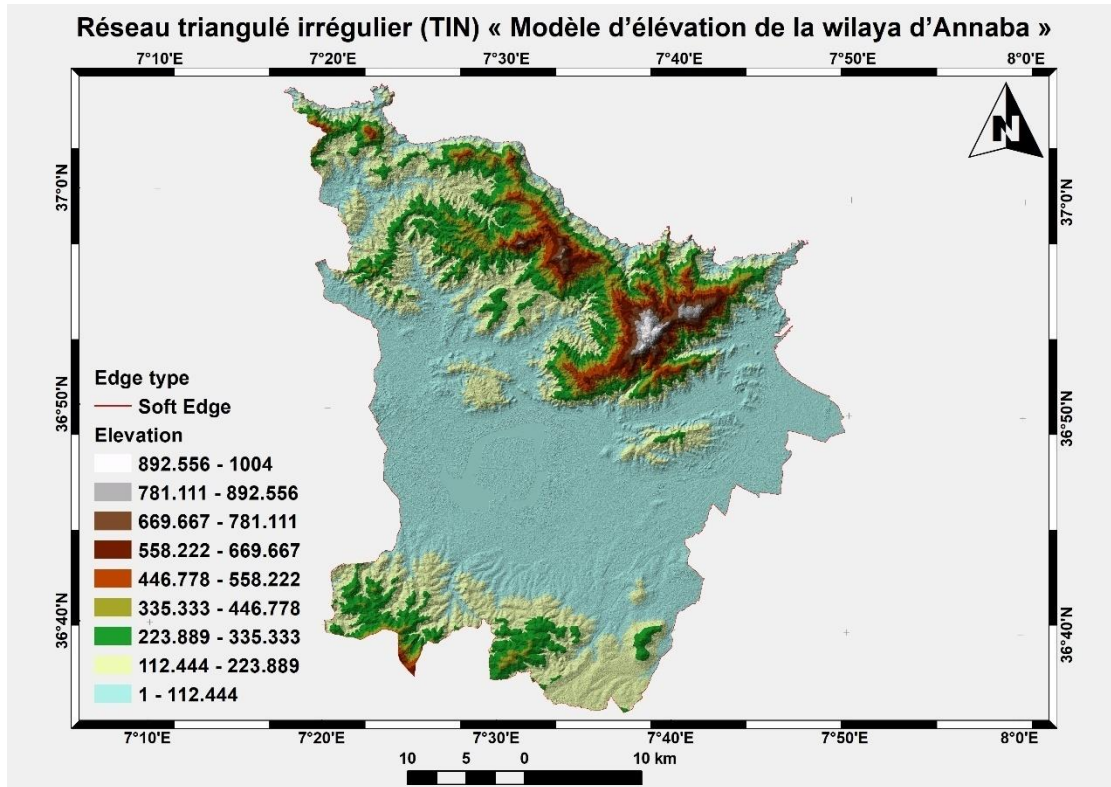


Figure 2. Représentation TIN en 3D de la topographie de la wilaya d'Annaba

- Les montagnes représentent 52,16 % du territoire de la wilaya soit, une superficie de 736 km². Elles se distinguent par le massif de l'Edough, ce dernier offre un paysage forestier remarquable.
- Les collines et les piémonts, occupent 25,82 % de la superficie totale, soit 365 km².
- Les plaines représentent 18,08 % du territoire soit 255 km², situant dans la zone comprise entre le pied mont de l'Edough et les coteaux d'Annaba et s'étendent vers le sud et occupant 25,82 % de la surface totale de la wilaya.
- Le reste du relief est constitué de plateaux, et autres, représentant 3,94 % de la superficie, soit 56 km².

¹ Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI), *Monographie des Wilayas : Wilaya d'Annaba* (2013), p. 7-8, URL : <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Annaba.pdf>

En outre, elle dispose un réseau hydrographique assez dense, constitué principalement du lac Fetzara et de l'Oued Seybouse (Fig. 3).



Figure 3. Représentation du relief et des réseaux hydrographiques de la wilaya d'Annaba (Conception P. Pentsch)

2.2.1. Massif de l'Edough

L'Edough est un massif montagneux qui constitue un segment de la chaîne de l'Atlas tellien, située dans l'est du pays. Ils s'étend entre le Cap de Garde (commune d'Annaba) et le Cap de Fer (commune d'El Marsa W. de Skikda). Le point culminant atteint les 1008 mètres d'altitude au mont Bou Zizi (commune de Seraïdi W. d'Annaba). Concernant la géologie, l'orogénèse est alpine, l'échelle des temps géologiques est le miocène et les roches sont de type cristalline et métamorphique (Caby et al. 2001). Presque toute la zone montagneuse est couverte de forêt méditerranéenne. La forêt du massif de l'Edough est très vulnérable aux incendies. De vastes surfaces ont été brûlées au cours des dernières décennies (Samraoui et Alfarhan 2015).

2.2.2. Oued Seybouse

L'Oued Seybouse, d'une longueur totale de 240 km, est une source d'eau importante, utilisée principalement pour l'irrigation de grandes plaines agricoles, s'étendant de la région de Guelma à la ville d'Annaba. Son embouchure est localisée dans la commune d'El Bouni (W. d'Annaba) et se jette dans la mer Méditerranée. Au total, le bassin s'étend sur les limites administratives de 68 communes situées dans 7 wilayas. Ses ressources en eau sont vitales pour soutenir la majorité des activités économiques de la région (Aichouri et al. 2015).

2.2.3. Lac Fetzara

Le lac Fetzara est un lac d'eau douce situé à 18 km au sud-ouest de la wilaya d'Annaba (Daïra et commune de Berrahal). S'étend sur 17 km de long et 13 km de large avec une superficie de 206,80 km². Le plan d'eau libre, qui dépend presque exclusivement de l'intensité de la saison des pluies, occupe une étendue de plus de 5800 ha. Il est répertorié sur la liste Ramsar des zones humides d'importance internationale depuis 2002. Sa grande étendue et son caractère relativement temporaire en font une zone humide représentative de la région méditerranéenne (Mellouk et Aroua 2015).

2.3. Aspect Administratif

Administrativement la wilaya d'Annaba est organisée en 12 Communes réparties sur 06 Daïras (Tab. 1).

Tableau 1. Découpage administratif de la wilaya d'Annaba (source : ONS)

Daïra	Nombre de communes	Communes	Code Géo
Annaba	2	Annaba	2301
		Seraïdi	2308
Aïn Berda	3	Aïn Berda	2309
		Cheurfa	2307
		Eulma	2304
El Hadjar	2	El Hadjar	2303
		Sidi Amar	2311
Berrahal	3	Berrahal	2302
		Oued El Aneb	2306
		Treat	2312
Chetaïbi	1	Chetaïbi	2310
El Bouni	1	El Bouni	2305

Les communes côtières et littorales appartenant au domaine littoral de la wilaya d'Annaba tel que délimité par la loi littorale sont indiquées dans le tableau suivante² :

Tableau 2. Communes côtières et littorales de la wilaya d'Annaba

5 communes côtières	Annaba, El Bouni, Oued El Aneb, Seraïdi, et Chetaïbi.
2 communes littorales	El Hadjar et Sidi Amar.

² Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme (MATET), *Le Littoral État et Perspective : Projet de Rapport*, (2008), p. 12, URL : <https://geosciencesmarinesalgerie.com/2019/11/02/rapport-du-littoral>

2.4. Contexte socio-économique

2.4.1. Population

La population de la wilaya d'Annaba est estimée à 637567 habitants en 2012³, soit une densité de 449 hab/km². En 2008, la population était de 609499 habitants contre 557819 habitants en 1998 avec un taux d'accroissement annuel moyen de 0,9 % entre 1998 et 2008 (ONS 2011).

2.4.2. Infrastructures de base existantes

2.4.2.1. Infrastructures routières

- Routes nationales (RN) : 131 km.
- Chemins de wilaya (CW) : 318.56 km.
- Chemins communaux (CC) : 234 km⁴.

2.4.2.2. Infrastructure Ferroviaire

Le réseau ferroviaire sur le territoire de la wilaya d'Annaba porte sur une longueur totale de 50 km⁵.

2.4.2.3. Infrastructure portuaire

- Un port commercial localisé dans la commune d'Annaba ;
- Un port de pêche à Annaba ;
- Un port de plaisance à Annaba ;
- Un port de pêche à Chetaïbi ;
- Un petit port de pêche au village de Aïn Barbar dans la commune de Seraïdi⁶.

2.4.2.4. Infrastructure aéroportuaire

Un aéroport international située dans de la commune d'El Bouni.

2.4.3. Infrastructures économique

2.4.3.1. Zones industrielles

Le tableau 3 résume le patrimoine industriel de la wilaya d'Annaba.

Tableau 3. Zones industrielles (ZI) de la wilaya d'Annaba (Source : ANIREF 2013)

Nom de la zone	Commune	Superficie (ha)
ZI Pont Bouchet	El Hadjar	117
ZI BERRAHAL	Berrahal	122
ZI MEBODJA	Sidi Amar	63
ZI M.I.N	El Bouni	51

³ Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF), *Rubrique Monographie Wilayas : Wilaya d'Annaba*, (2013), p. 4.

⁴ Ministère des Travaux Publics (MTP), URL : <http://www.mtp.gov.dz/fr/permalink/3288.html>

⁵ Agence Nationale de Développement de l'Investissement (ANDI), *Monographie des Wilayas : Wilaya d'Annaba* (2013), p. 10, URL : <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Annaba.pdf>

⁶ *Ibid.*, p. 12.

2.4.3.2. Zones d'activités

Le tableau 4 résume les zones d'activités de la wilaya d'Annaba.

Tableau 4. Zones d'activités(ZAC) de la wilaya d'Annaba (Source : ANIREF 2013)

Nom de la zone	Commune	Superficie (ha)
Sidi Salem	El Bouni	11,5
El Hadjar	El Hadjar	1,9
Aïn Berda	Aïn Berda	13,5
Eulma	Aïn Berda	5
Oued El Aneb	Oued El Aneb	9,7
Boukhmira	El Bouni	8,5
El Gantra	El Hadjar	4.2

2.4.4. Sites de recherche minière

La wilaya d'Annaba dispose des trois sites suivants :

- Kherraza pour la recherche du minerai de fer ;
- Chetaïbi pour recherche du minerai de pouzzolane et de l'or natif ;
- L'Edough pour la recherche de minerai de cuivre et de zinc.

3. Communes côtières comme zone focale

Les communes côtières de la wilaya d'Annaba couvrent la partie nord sur une superficie d'environ 604 km². Elles sont situées entre les latitudes ; 37° 5' Nord, 36° 47' Nord et les longitudes ; 7° 17' Est, 7° 49' Est (Fig. 4).

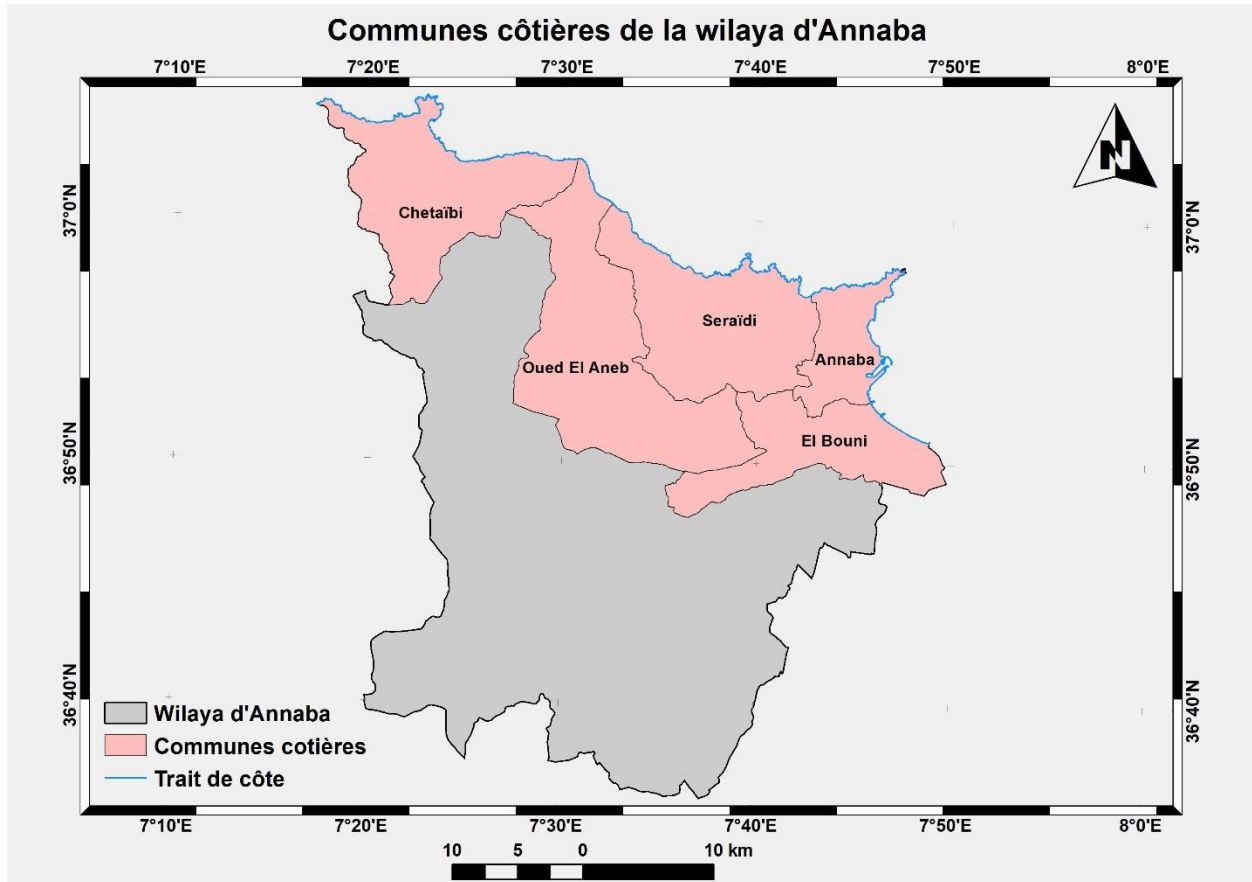


Figure 4. Localisation des communes côtières de la wilaya d'Annaba

3.1. Population des communes côtières

Selon les résultats préliminaires du RGPH 1998, la population des communes côtières est de 498506 habitants dont 411467 habitants concernent le domaine littoral, soit une densité de 1787,35 hab/km². La population du domaine littoral représente 82,54% de la population des communes côtières⁷.

⁷ Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme (MATET), *Le Littoral État et Perspective : Projet de Rapport*, (2008), p. 52-70, URL : <https://geosciencesmarinesalgerie.com/2019/11/02/rapport-du-littoral/>

La classification des communes et leur typologie en fonction du degré d'urbanisation :

- Prédominance urbaine (PU), si la part de la population vivant dans les zones urbaines est supérieure à 75%.
- Prédominance rurale (PR), si la part de la population vivant dans les zones urbaines est inférieure à 45%.
- Entièrement rurale (ER) (ONS 2011).

Tableau 5. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'Annaba

Commune d'Annaba	
Code Géo	2301
Population (RGPH 2008)	257359 hab
Taux d'accroissement (1998-2008)	0.4 %
Degré d'urbanisation	Prédominance urbaine (PU)
Agglomérations et localités	- Agglomération Chef-lieu : <ul style="list-style-type: none"> • Annaba « métropole urbaine »

Tableau 6. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'El Bouni

Commune d'El Bouni	
Code Géo	2305
Population (RGPH 2008)	125265 hab
Taux d'accroissement (1998-2008)	1.2 %
Degré d'urbanisation	Prédominance urbaine (PU)
Agglomérations et localités	- Agglomération chef-lieu : <ul style="list-style-type: none"> • El Bouni « urbaine » - Agglomération secondaire : <ul style="list-style-type: none"> • Bou Khadra « urbaine » • Chabbia « sub-urbaine » • Kheraza-Cité 1^{er} Mai 56 « sub-urbaine » • Essarouel « sub-urbaine » - Agglomération semi-rural : <ul style="list-style-type: none"> • Oued Ennil - Localités : <ul style="list-style-type: none"> • Sidi Salem (Banlieue) • Gharbi Aïssa (Village) • Chouali Belkacem (Village)

Tableau 7. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune d'Oued El Aneb

Commune d'Oued El Aneb	
Code Géo	2306
Population (RGPH 2008)	21088
Taux d'accroissement (1998-2008)	2 %
Degré d'urbanisation	Prédominance rurale (PR)
Agglomérations et localités	<ul style="list-style-type: none"> - Agglomération chef-lieu : <ul style="list-style-type: none"> • Oued El Aneb « semi-rurale » - Agglomération secondaire : <ul style="list-style-type: none"> • Kherraza « sub-urbaine » - Agglomération semi-rurale: <ul style="list-style-type: none"> • Draa Errich - Localités : Oued Zied

Tableau 8. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune de Seraïdi

Commune de Seraïdi	
Code Géo	2308
Population (RGPH 2008)	7626 hab
Taux d'accroissement (1998-2008)	0.6 %
Degré d'urbanisation	Prédominance urbaine (PU)
Agglomérations et localités	<ul style="list-style-type: none"> - Agglomération Chef-lieu : <ul style="list-style-type: none"> • Seraïdi « sub-urbaine » - Localités : <ul style="list-style-type: none"> • Aïn Barbar « village » • Bou Zizi « village »

Tableau 9. Population, degré d'urbanisation et agglomérations/localités de la commune de Chetaïbi

Commune de Chetaïbi	
Code Géo	2310
Population (RGPH 2008)	8035 hab
Taux d'accroissement (1998-2008)	0,6 %
Degré d'urbanisation	Entièrement rurale (ER)
Agglomérations et localités	<ul style="list-style-type: none"> - Agglomération Chef-lieu : <ul style="list-style-type: none"> • Chetaïbi « semi-rurale » - Localités : <ul style="list-style-type: none"> • El Azla « Village » • Oued El Ghenem « Village » • Zaouia « Village » • Zgaa « Village »

3.2. Présentation du littoral

Le littoral de la wilaya d'Annaba s'étend sur un linéaire côtier de près de 122.5 km, d'Exutoire les Salines à l'extrême nord-est de la commune d'El Bouni jusqu'au Oued de Sidi-Akkache à l'extrême nord-ouest de la commune de Chetaïbi (Fig. 5).

La zone urbanisée longe 31.8 km, tandis que la zone naturelle compte 90.7 km, cette dernière s'étend de Cap de Garde jusqu'à Ras Sidi Takkouch et de l'extrémité du port de Chetaïbi jusqu'à Ras Sidi Akkacha⁸.

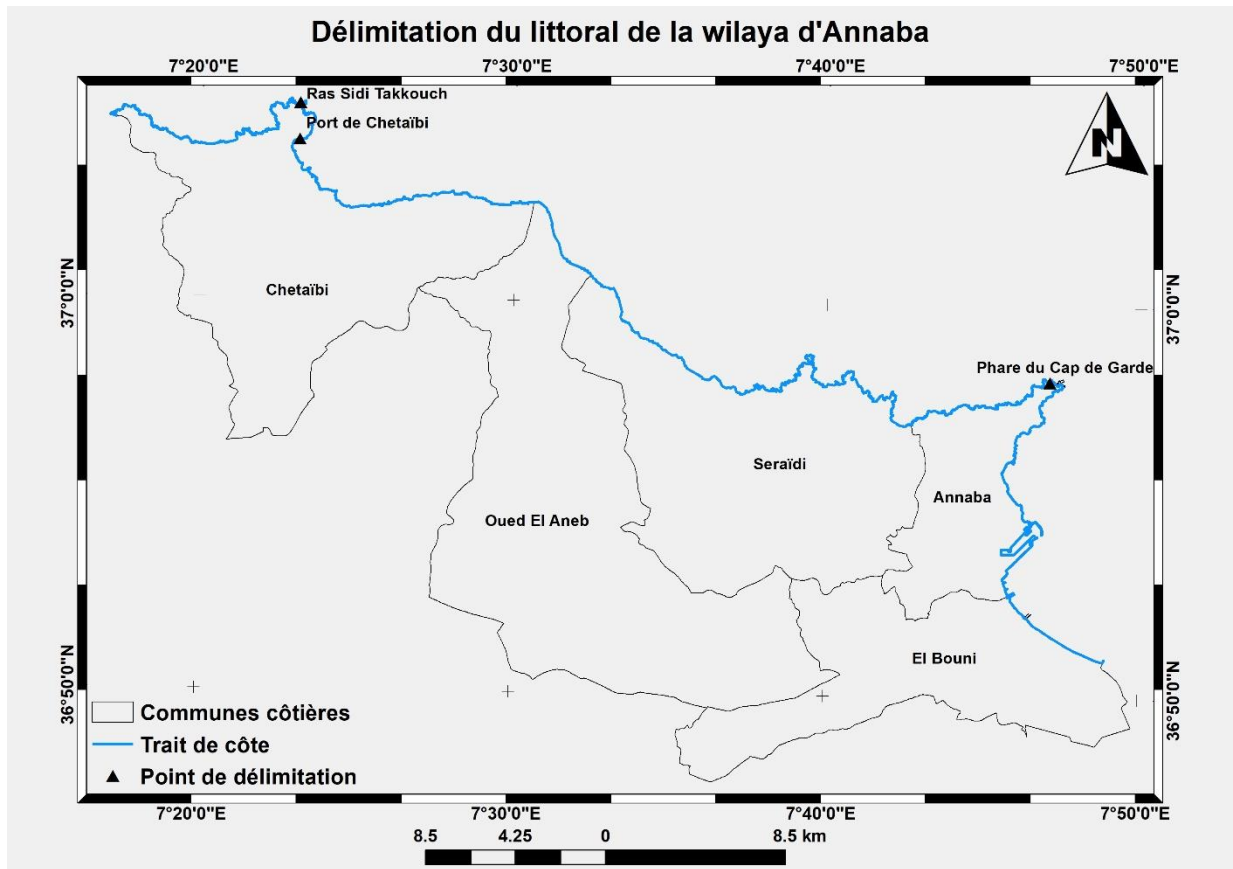


Figure 5. Délimitation du littoral de la wilaya d'Annaba

Les espaces terrestres remarquables du littoral de la wilaya d'Annaba sont résumées dans le tableau ci-dessous⁹.

Tableau 10. Espaces terrestres remarquables du littoral de la wilaya d'Annaba.

Iles	Ilots	Dunes	Zones Humides	Côtes rocheuses	Falaises	Caps	Forêts
01	88	01	04	09	13	04	07

⁸Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme (MATET), *Le Littoral État et Perspective : Projet de Rapport*, (2008), p. 28, URL : <https://geosciencesmarinesalgerie.com/2019/11/02/rapport-du-littoral/>

⁹*Ibid.*, p. 29.

Le littoral d'Annabase caractérise par l'abondance de falaises et de côtes rocheuses, ainsi qu'un cordon dunaire qui s'étend d'Exutoire les salines à l'embouchure de l'Oued Seybouse ¹⁰.

Les éléments morphologiques et la lithologie des roches de la côte de la wilaya d'Annabasont illustrées dans la figureci-dessous.

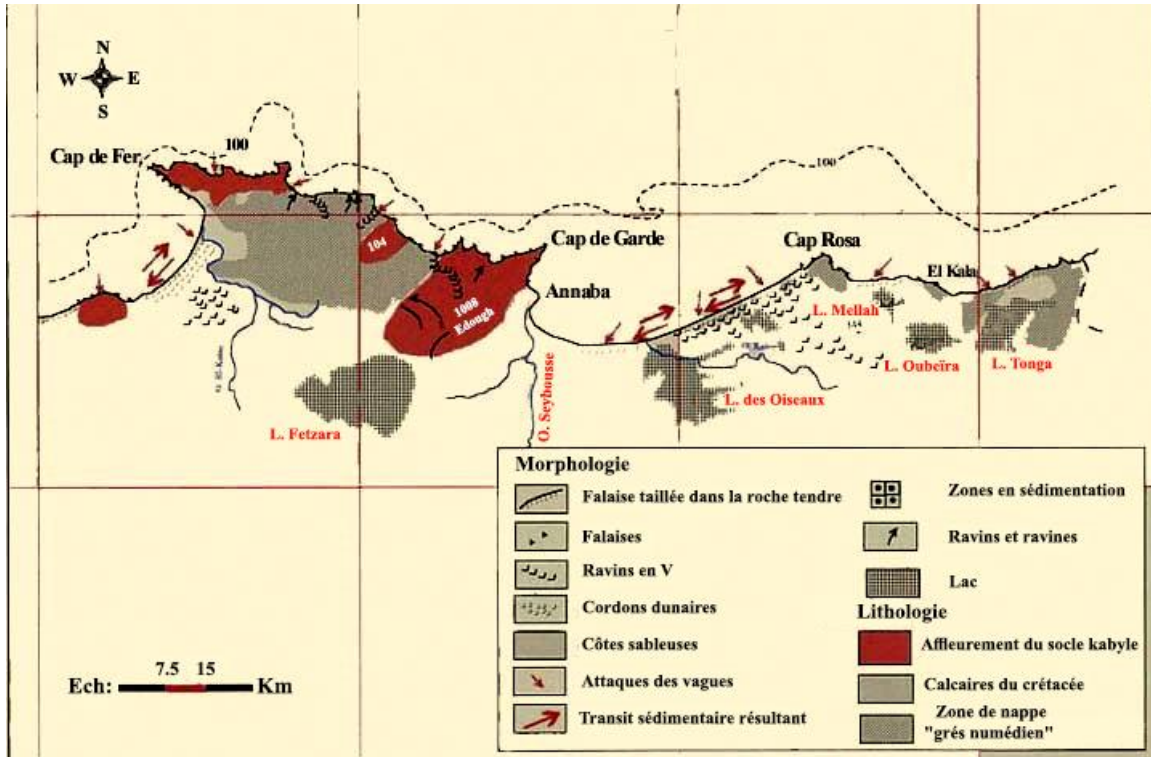


Figure 6. Éléments morphologiques de la cote Algérienne (Wilayas d'Annaba et d'El Tarf)(Source : MATE 2008)

- La wilaya d'Annaba dispose de trois zones d'expansion et sites touristiques (ZEST) : corniche d'Annaba (commune d'Annaba), Oued Bograt (commune de Seraïdi) et Baie Ouest (commune de Chetaïbi)¹¹.

Tableau 11. ZEST du Littoral d'Annaba

Nombre de ZEST	Superficie totale (ha)	Superficie aménageable (ha)
3	2059	416

- La superficie agricole utile (SAU) du littoral est estimée à environ 14460 ha¹².
- Les forêts occupent près de 57% du territoire du littoral d'Annaba Avec une superficie de 13155.83 ha (forêt d'Annaba « Mont de l'Edough », forêt et maquis d'El Bouni)¹³.

¹⁰Ibid., p.19.

¹¹Ibid., p. 48.

¹²Ibid.,p. 40.

¹³Ibid., p. 41.

Chapitre III

Matériels et Méthodes

Introduction

Avant d'entamer la méthodologie proposée dans cette étude, il est essentiel de souligner la différence entre l'occupation du sol (*land cover*) et l'utilisation du sol (*Land use*). Les données sur l'occupation du sol indiquent dans quelle mesure une région est recouverte de forêts, de zones humides, de surfaces imperméables, d'agriculture, de zones urbaines et d'autres types de terres et d'eau alors que, l'utilisation du sol montre comment l'homme utilise le paysage - que ce soit pour le développement, la conservation ou des utilisations mixtes. Les différents types d'occupation du sol peuvent être gérés ou utilisés de manière très différente. L'occupation du sol peut être déterminée en analysant les images satellites alors que l'utilisation du sol ne peut pas être déterminée à partir d'images satellites seulement.

En aménagement et en gestion du littoral, les données et les cartes de l'occupation du sol sont utilisées pour mieux comprendre les impacts sur le paysage qu'ils soient dus à des phénomènes anthropiques ou naturels. Les cartes peuvent aider les gestionnaires à évaluer la croissance urbaine, à modéliser les problèmes de la qualité de l'eau, à prévoir et à évaluer les impacts des inondations et des ondes de tempête, à suivre les pertes en zones humides et les impacts potentiels de l'élévation du niveau de la mer, à hiérarchiser les zones pour les efforts de conservation et à comparer les changements de l'occupation du sol aux effets sur l'environnement ou aux liens dans les changements socio-économiques tels que la croissance démographique (NOAA s. d.).

Pour mener à bien le processus de télédétection du changement entre les années 2000 et 2019, nous avons utilisé la technique de la différence d'indice spectral et la classification supervisée pour enfin interpréter et comparer les résultats. Ce processus a été effectué en utilisant les données Landsat 7 et Landsat 8 de niveau-2 (réflectance de surface) pour la période entre 2000 et 2015 puis, a été poursuivi en utilisant les données Sentinel-2 de niveau-2A et les données Sentinel-1 de type complexe à visée simple acquises en mode interférométrie (IW-SLC) pour la période entre 2015 et 2019.

Dans un premier temps, les données optiques Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI/TIRS, et Sentinel-2 MSI ont été traitées afin de dériver les indices spectraux NDVI et EBBI (l'EBBI concerne les données ETM+ et OLI/TIRS). Ensuite, l'ancienne image a été soustraite de l'image récente (Date 2 - Date 1) pour produire l'image de différence (ou de changement). Cette dernière met en évidence les zones où le changement a eu lieu et renseigne aussi sur son type. Afin d'estimer le changement, une classification supervisée a été réalisée.

En ce qui concerne les données SAR Sentinel-1 IW SLC, un traitement de données a été réalisé pour dériver la cohérence interférométrique. Par la suite, les images de cohérence (de 2015 et de 2019) ont été classées par la méthode supervisée et comparées afin d'estimer le changement entre les deux dates. Les étapes de traitement des images radar sont inspirés du webinaire « *Urban classification with Sentinel-1* » disponible sur le service RUS (*Research and User Support*) fournit par l'ESA dans le cadre du programme Copernicus.

En outre, le traitement des données géospatiales « OSM » a été effectué pour extraire les couches vectorielles (limites administratives et trait de côte) utilisées au cours du processus ainsi que le traitement du modèle numérique de terrain « ASTER GDEM version 3 » pour créer les modèles d'élévation.

1. Identification des scènes

Il est à noter que la définition de l'axe temporel s'est faite en fonction de la disponibilité des différentes missions à moyenne résolution spatiale et à libre accès depuis l'an 2000 permettant de dérouler la méthodologie suggérée alors que le choix des images est conditionné par un certain nombre de critères tels que la faible couverture nuageuse, les mêmes conditions d'éclairements solaires (même saison), etc.

Pour l'an 2000 nous avons acquis :

- Une scène Landsat 7 ETM+ du 27 juin 2000, identifiée par la trajectoire orbitale (*Path*) 193 et la ligne (*Row*) 34 de la grille WRS-2. La scène a été capturée dans des conditions atmosphériques claires (couverture nuageuse sur terre égale à 0%) et les deux niveaux de traitement (niveaux 1 et 2) ont été téléchargés.

Pour l'an 2015 nous avons acquis :

- Une scène Landsat 8 OLI/TIRS du 29 juin 2015, identifiée par la trajectoire orbitale 193 et la ligne 34. La scène a été capturée dans des conditions atmosphériques claires (couverture nuageuse sur terre égale à 0,03%). Les deux niveaux de traitement ont été téléchargés.
- Une scène Sentinel-2A MSI de niveau-1C (L1C) du 04 juillet 2015. Ce produit consiste en une compilation de deux tuiles : la tuile T32SLF et la tuile T32SLG ; « T » signifie tuile, « 32 » est la zone UTM, « S » désigne bandeau en latitude, « L » correspond à la position de la tuile sur l'axe Ouest-Est et « F/G » sur l'axe Sud-Nord. La couverture nuageuse pour les deux tuiles est de 0 %.
- Deux produits de données Sentinel-1A IW SLC, datés respectivement du 01 juin 2015 et du 13 juin 2015.

Pour l'an 2019 nous avons acquis :

- Une scène Sentinel-2A MSI de niveau-2A du 23 juillet 2019. Ce produit est une compilation de deux tuiles (T32SLF et T32SLG). La couverture nuageuse pour les deux tuiles est respectivement de 0.023244% et de 0.00171%.
- Deux produits de données Sentinel-1A IW SLC, datés respectivement du 04 juin 2019 et du 16 juin 2019.

Les scènes Landsat 7-8 et Sentinel-2 sont fournies dans la projection UTM Zone 32 Nord/WGS-84 alors que, les scènes Sentinel-1 sont fournies dans la géométrie radar.

Les scènes Landsat ont été téléchargées à partir du site Web *USGS Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) et les scènes Sentinel à partir du site Web *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/>).

2. Traitement des données vectorielles

Afin d'obtenir les couches SIG vecteur des limites administratives et du trait de côte, nous avons opté pour les données OSM téléchargées à partir du site web (openstreetmap.org). Elles sont livrées sous le format du fichier OSM XML (*eXtensible Markup Language*) d'extension (.osm). Nous avons extrait les couches suivantes :

- Les limites administratives de la wilaya d'Annaba et de ses communes côtières. Il est à préciser que la source d'origine de ces données est l'institut national de cartographie et de télédétection (INCT) selon les métadonnées indiquées.
- Le trait de côte de la wilaya d'Annaba. La source de données indiquée dans les métadonnées est le PGS (*Prototype Global Shoreline*) ; c'est un prototype mondial de données sur le trait de côte créé par la NGA (*National Geospatial-intelligence Agency*) qui relève du département de la défense des États-Unis.

L'extraction des couches suscitées s'est réalisée à l'aide du logiciel Spatial Manager Desktop. Ci-dessous les étapes suivies :

- Chargement du fichier OSM de la wilaya d'Annaba via le panneau *Data sources* ;
- Sélection des entités à extraire depuis la fenêtre *Connection Parameters* :
 - Pour le chargement de données des limites administratives : depuis la catégorie principale *Boundary* > la sous-catégorie *Administrative* a été sélectionnée.
 - Pour le chargement de données du trait de côte : depuis la catégorie principale *Natural* > la sous-catégorie *Coastline* a été sélectionnée.

Les entités ont été chargées dans le logiciel sous forme de couches de données (*DataLayers*).

- Exportation de données des limites administratives de la wilaya (niveau administratif-4) et celles des communes côtières (niveau administratif-8) avec les caractéristiques suivantes :
 - Format : ESRI Shapefile ;
 - Type de géométrie : polygone ;
 - Système de référence des coordonnées : WGS 84 ;
 - Projection cartographique : UTM zone 32 Nord.
- Exportation de données du trait de côte segmenté, car à l'origine il est divisé en plusieurs parties, suivant les caractéristiques ci-dessous :
 - Format : ESRI Shapefile ;
 - Type de géométrie : ligne (entité linéaire) ;
 - Le système de référence des coordonnées : WGS 84 ;
 - Projection cartographique : UTM zone 32 Nord.

2.1. Edition des données vectorielles

2.1.1. Fusionnement des entités linéaires

Les parties du trait de côte de la wilaya d'Annaba ont été fusionnées à l'aide de l'outil *Merge* du logiciel ArcMap accessible via : *ArcToolbox > Data Management Tools > General > Merge*.

2.1.2. Fractionnement du trait de côte

Cette opération a pour but d'obtenir le trait de côte de chaque commune côtière. Le fractionnement a été fait manuellement à l'aide de l'outil *Split* dans ArcMap. Le fractionnement se fait au point de sommet (*vertex point*) matérialisant l'intersection de l'entité linéaire (trait de côte) avec la limite de chaque polygone (i.e. de chaque commune côtière).

2.1.3. Création des bandes littorales

La bande littorale de 100 m est définie à l'article (45) de la loi 90-29 du 1^{er} décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme. Alors que, les bandes littorales de 300 m, de 800 m et de 3 km sont définies à l'article (07) de la loi 02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.

Les couches vectorielles (polygones) des bandes littorales ont été créées en utilisant une opération topologique qui est la mise en tampon à l'aide de l'outil *Buffer* dans le logiciel ArcMap, comme suit :

- Exécution de l'outil *Buffer* via : *ArcToolbox > Analysis tools > Proximity > Buffer* ;
- Chargement de l'entité d'entrée (une à la fois, le trait de côte de la wilaya d'Annaba et le trait de côte de chaque commune côtière) ;
- Réglage des paramètres de l'opération : la distance de la mise en tampon a été définie en fonction de la bande littorale concernée (en mètres), les côtés du *Buffer* ; dans notre cas c'est le côté sud (gauche topologique), le type d'extrémités *Plata* été sélectionné et la méthode de la mise en tampon *Planara* été utilisée car l'entité d'entrée est dans un système de coordonnées projeté (WGS84/UTM Z32N).

2.1.4. Ajout des attributs géométriques

Les shapefiles ont été importés dans QGIS pour effectuer une opération non-topologique via : *Vector > Geometry tools > Add Geometry Attributes*. Cette opération dépend du type de géométrie de l'entité :

- Pour les polygones, les attributs ajoutés sont la superficie et le périmètre ;
- Pour les lignes, l'attribut ajouté est la longueur.

Le processus abouti à l'obtention automatique :

- Des superficies calculées de la wilaya d'Annaba ainsi que celles de ses bandes littorales ;
- De la superficie de chaque commune côtière et de ses bandes littorales ;
- De la longueur du trait de côte de la wilaya et de chaque commune côtière.

3. Traitement des images satellites optiques

3.1. Données Landsat

Rappelant que L'USGS fournit des données de haute qualité corrigées systématiquement, géométriquement, radiométriquement et avec correction de terrain pour les produits de niveau-1. En outre, les produits de niveau-2 (réflectance de surface) qui sont créés à partir des produits de niveau-1 associés, sont corrigés des effets atmosphériques.

3.1.1. Création d'une image composite

Les données Landsat sont livrées au format GeoTIFF dans des fichiers compressés au format tar.gz. Les données Landsat 7 ETM+ de niveau-2 (réflectance de surface) contiennent 6 bandes spectrales de réflectance de surface (USGS 2019). D'autre part, les données Landsat 8 OLI/TIRS de niveau-2 contiennent 7 bandes spectrales de réflectance de surface (USGS 2018a). Les bandes thermiques et la bande panchromatique ne sont pas traitées en fonction de la réflectance de surface. Les bandes spectrales d'ETM+ et d'OLI traitées en fonction de la réflectance de surface sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12. Bandes spectrales d'ETM+ et d'OLI traitées en fonction de la réflectance de surface

Bandes de Réflectance de Surface (SR) Landsat-7 (μm)			Bandes de Réflectance de Surface (SR) Landsat-8 (μm)		
			Bande 1	Côtier/Aérosol	0.435 - 0.451
Bande 1	Bleu	0.441 - 0.514	Bande 2	Bleu	0.452 - 0.512
Bande 2	Vert	0.519 - 0.601	Bande 3	Vert	0.533 - 0.590
Bande 3	Rouge	0.631 - 0.692	Bande 4	Rouge	0.636 - 0.673
Bande 4	PIR	0.772 - 0.898	Bande 5	PIR	0.851 - 0.879
Bande 5	IRCL-1	1.547 - 1.749	Bande 6	IRCL-1	1.566 - 1.651
Bande 7	IRCL-2	2.064 - 2.345	Bande 7	IRCL-2	2.107 - 2.294

Chaque bande spectrale est une image en niveaux de gris, ces dernières doivent être empilées (*layer stacking*) et enregistrées dans une image composite (ou image multibande). Les étapes de la création d'une image composite sont les suivantes :

- Chargement des bandes spectrales GeoTIFF après la décompression du fichier tar.gz dans le logiciel QGIS ;
- Ouverture de l'outil de fusion des couches raster via la commande : *Raster > Miscellaneous > Merge* ;
- Réglage des paramètres du processus : la sélection multiple des bandes spectrales via l'identifiant *Input Layers*, en cochant l'option « *place each input file into a separate band* » pour indiquer au logiciel que les bandes doivent rester séparées, l'identifiant *Output Data Type* sert à choisir le type de données pour l'image de sortie ; le type *Float32a* a été choisi et le répertoire de sauvegarde de l'image de sortie a été défini via l'identifiant *Merged*.

3.1.2. Extraction de la zone d'étude

Cette opération sert à délimiter la zone d'étude (ou d'intérêt) pour créer une sous-scène à partir de la scène Landsat originelle. La zone d'intérêt (*Area of interest- AOI*) est définie par le shapefile des limites administratives de la wilaya d'Annaba ; la définition de la zone d'intérêt va servir à extraire un sous-ensemble spatial des données d'image à analyser ; les données de l'image raster seront ainsi découpées selon la même étendue géographique (spatiale) de la couche des limites administratives. Ci-dessous, sont citées les étapes suivies :

- Chargement de l'image composite dans QGIS ;
- Ouverture de l'outil de découpage de couches raster par étendue spatiale via : *Raster>Extraction> Clip raster by Extent*,
- Réglage des paramètres du processus : l'image composite a été entrée via l'identifiant *Input Layer* (couche d'entrée) et le shapefile des limites administratives a été entré via l'identifiant *Clipping Extent*.

3.1.3. Traitement des bandes thermiques

3.1.3.1. Landsat 7 ETM+

Chaque bande Landsat-7 est livrée sous forme d'image GeoTIFF 8 bits en niveaux de gris (entier non signé sur 8-bits, en anglais *8-bit unsigned integer*). Les données thermiques sont acquises dans deux bandes à partir d'un même détecteur à la fois en gain élevé (*band 6-High Gain*) et faible (*band 6-Low Gain*). La différence de réglage du gain est importante pour différents types d'études. Outre les différences de résolution et la saturation aux extrémités haute et basse, les deux bandes fournissent les mêmes comptes numériques (valeurs DN) pour chaque pixel.

- Bande 6-1 (Gain Élevé): fournit une plage dynamique étendue et une résolution radiométrique inférieure (sensibilité), avec une saturation moindre aux valeurs DN élevées.
- Bande 6-2 (Faible Gain) : a une résolution radiométrique (sensibilité) plus élevée, bien que sa plage dynamique soit plus restreinte et risque davantage de saturer les cibles chaudes (USGS 2018b).

A cet effet, l'utilisation de la bande 6-1 est plus pratique. As-syakur et al (2012) ont également confirmé l'utilisation de cette bande après sa conversion en radiance spectrale au sommet de l'atmosphère pour le calcul de l'EBBI.

3.1.3.1.1. Conversion en radiance spectrale

Lors du rendu du produit de niveau-1, les pixels de l'image sont convertis du DN en unités de radiance spectrale absolue à l'aide de calculs en virgule flottante sur 32 bits. Les valeurs de pixels sont ensuite mises à l'échelle en octets avant la sortie de l'image (USGS 2018b). L'équation suivante est utilisée pour convertir les DN dans un produit de niveau-1 en unités de radiance spectrale :

Équation 5. Conversion en radiance spectrale-Landsat 7 ETM+

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{(QCALMAX - QCALMIN)} \times (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (5)$$

Où :

- L_{λ} = radiance spectrale à l'ouverture du capteur en (Watts / (m² * sr * μm)) ;
- $LMIN_{\lambda}$ = radiance spectrale échelonnée à QCALMIN en (Watts / (m² * sr * μm)) ;
- $LMAX_{\lambda}$ = radiance spectrale échelonnée à QCALMAX en (Watts / (m² * sr * μm)) ;

($LMAX_{\lambda}$ et $LMIN_{\lambda}$ sont fournies dans le fichier de métadonnées).

- QCALMIN = valeur de pixel minimum quantifiée et calibrée (correspondant à $LMIN_{\lambda}$) en DN ;

= 1 pour les produits LPGS.

= 1 pour les produits NLAPS traités après le 04/04/2004.

= 0 pour les produits NLAPS traités avant le 05/04/2004.

- QCALMAX = valeur de pixel maximum quantifiée et calibrée (correspondant à $LMAX_{\lambda}$) en DN = 255 ;
- QCAL = Valeur de pixel calibrée et quantifiée en DN.

L'application numérique a été réalisée avec le logiciel QGIS à l'aide de l'outil *Raster Calculator* ; un outil qui relève de l'algèbre sur les cartes (*map algebra*). Pour mieux illustrer le fonctionnement de l'équation, nous fournissons un exemple de calcul pour la bande « B6_VCID_1 » de la scène Landsat 7 ETM + comme suit :

- Chargement de la bande 6_VCID_1 dans QGIS après la décompression du produit de niveau-1.
- Définition des variables de l'équation :
 - $LMAX_{\lambda} = RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6_VCID_1 = 17.040$;
 - $LMIN_{\lambda} = RADIANCE_MINIMUM_BAND_6_VCID_1 = 0.000$;
 - $QCALMIN = 1$ (Parce que ce produit a été traité à l'aide du logiciel LPGS version 12.8.3) ;
 - $QCALMAX = 255$;
 - $QCAL = LE07_L1TP_193034_20000627_20170211_01_T1_B6_VCID_1$.

- L'équation exploitée dans l'outil *Raster Calculator* :

$$\left(\left(\frac{17.040 - 0}{255 - 1} \right) * \left(\text{"LE07_L1TP_193034_20000627_20170211_01_T1_B6_VCID_1@1"} - 1 \right) + 0 \right)$$

La figure ci-dessous représente la bande thermique 6-1 du ETM+ avec les histogrammes associés pour avant et après le traitement à la radiance spectrale ; à gauche les pixels sont en valeurs DN tandis qu'à droite, ils sont en unités de radiance spectrale.

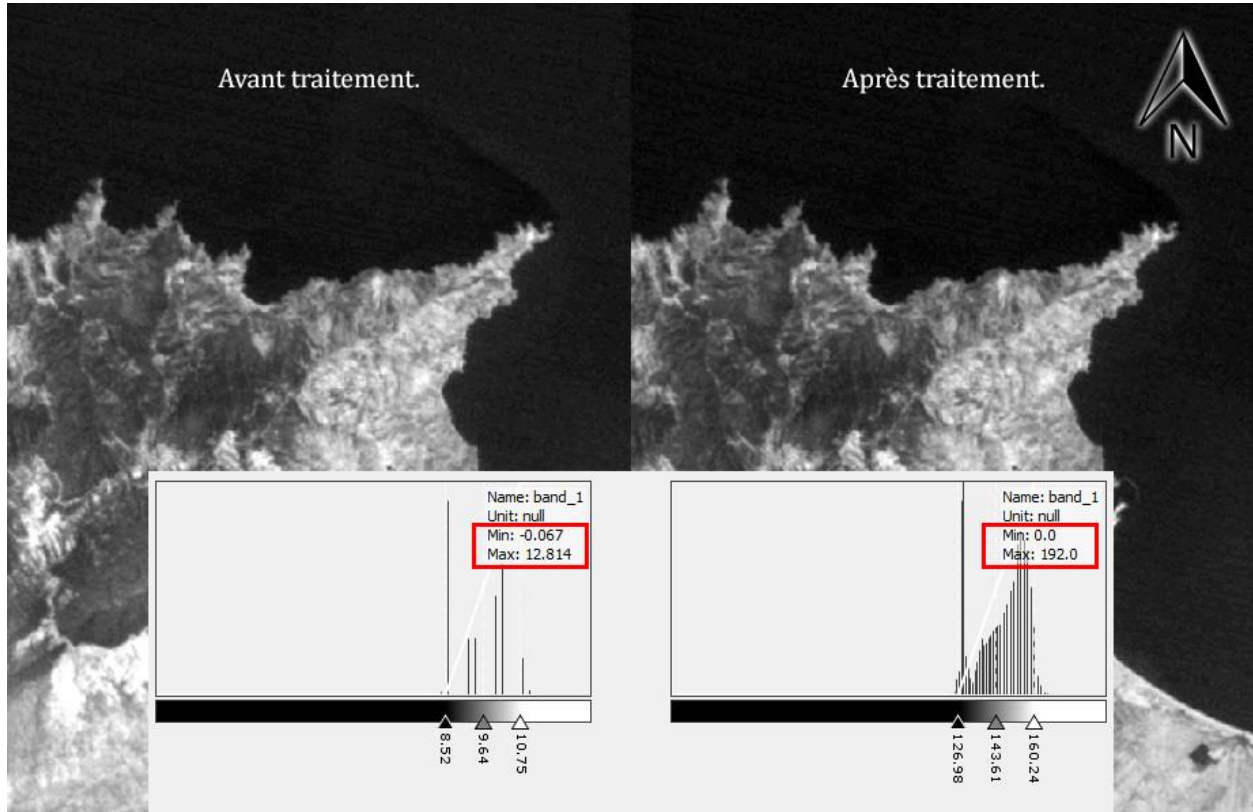


Figure 7. Bande thermique 6-1 del'ETM+ du 27 juin 2000 (vue sur la ville d'Annaba), à gauche avant le traitement à la radiance spectrale, à droite après le traitement à la radiance spectrale (interface du logiciel SNAP).

- Extraction de la zone d'intérêt de l'image de sortie.

3.1.3.2. Landsat 8 OLI/TIRS

Chaque bande Landsat-8 est présentée sous la forme d'une image (GeoTIFF) en niveaux de gris 16 bits. (*16-bit unsigned integer*) (USGS 2018c). Le TIRS contient deux bandes thermiques, conçues pour permettre l'utilisation d'algorithmes de récupération de la température de surface à fenêtre divisée. Cependant, en raison de l'incertitude d'étalonnage plus grande associée à la bande 11, il est recommandé aux utilisateurs de ne pas utiliser les données de la bande 11 (USGS 2016).

3.1.3.2.1. Conversion en radiance spectrale

Lors du rendu du produit de niveau-1, les pixels de l'image sont convertis du DN en unités de radiance spectrale absolue à l'aide de calculs en virgule flottante sur 32 bits. Les valeurs des pixels sont ensuite mises à l'échelle en octets avant la sortie de l'image (USGS2018c). L'équation suivante est utilisée pour convertir les DN dans un produit de niveau-1 en unités de radiance spectrale :

Équation 6. Conversion en radiance spectrale-Landsat 8 OLI/TIRS

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (6)$$

Où :

- L_{λ} = radiance spectrale en (Watts / (m² * sr * μm))
- M_L = Facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées (RADIANCE_MULT_BAND_x, où est le numéro de bande)
- Q_{CAL} = Valeurs de pixel du produit standard quantifiées et calibrées (DN)
- A_L = Facteur de mise à l'échelle additive spécifique à la bande à partir des métadonnées (RADIANCE_ADD_BAND x, où x est le numéro de bande).

L'application numérique a été réalisée avec logiciel QGIS à l'aide de l'outil *Raster Calculator*.

L'équation exploitée dans l'outil *Raster Calculator* est la suivante :

```
0.0003342 * "LC08_L1TP_193034_20150629_20170407_01_T1_B10@1" + 0.1
```

3.1.4. Mise en correspondance d'images

Cette étape a été réalisée avec l'outil AutoSync Workstation intégré dans le logiciel ERDAS IMAGINE, comme suit :

- Création d'un nouveau projet en sélectionnant l'option *Create a new project* ; une fenêtre apparaîtra dans laquelle plusieurs options doivent être définies :
 - *Workflow* : pour définir la méthode d'alignement. Le choix s'est porté sur l'option *Georeferencing* (géoréférencement).
 - *Project File* : pour sélectionner le répertoire de sauvegarde du fichier du projet d'extension (.lap).
 - *Geocorrection* : pour spécifier les propriétés de l'image (ou d'images) de sortie. Le type de géocorrection sélectionné a été *Calibrate*.
 - *Output directory* : sert à choisir le répertoire de sortie.
 - *Output File Name Suffix* : permet l'attribution d'un suffixe au nom de l'image de sortie (e.g., *_Auto_Sync*).
 - *Generate Summary Report* : pour générer un rapport sommaire de l'opération dans le format HTML.
- Sélection de l'image d'entrée (l'image de date 2) via *Open input Images*, et de l'image de référence (l'image de date 1) via *Open Reference Image*.

- Lancement de la fonction APM à partir de l'icône *Run APM* ; APM est l'acronyme de *Automatic Point Matching* ; la fonction qui collecte automatiquement les points d'appui ou GCP (*Ground Control Points*) sur les images. Avant le calcul APM, les paramètres relatifs à la stratégie d'identification automatique des GCP, au modèle géométrique et au système de référence de l'image à enregistrer sont disponibles dans la fenêtre «*Project Properties*» auquel on accède via : *Process > Project Properties* pour définir certaines propriétés associées :
 - *Input Layer to Use* : sélection de la bande spectrale d'entrée. La bande 4 d'OLI a été utilisée.
 - *Reference Layer to Use* : sélection de la bande spectrale de référence. La bande 3 d'ETM+ a été utilisée.

Les erreurs sur les GCP, et le RMSE (*Root Mean Square Error*) ont été calculées. Les GCP ayant un résidu supérieur à 0,5 pixel ont été supprimés (*Error > Sort by Z-A*). Après avoir supprimé ces points, le modèle géométrique a été résolu en utilisant le nouvel ensemble de points à partir de l'option «*solve geometric model using current set of points*» (Maldera 2016).

- Étalonnage de l'image d'entrée, via *Process > Calibrate/Resample*. La figure ci-dessous montre l'image de sortie issue de cette opération (l'image Landsat 8).

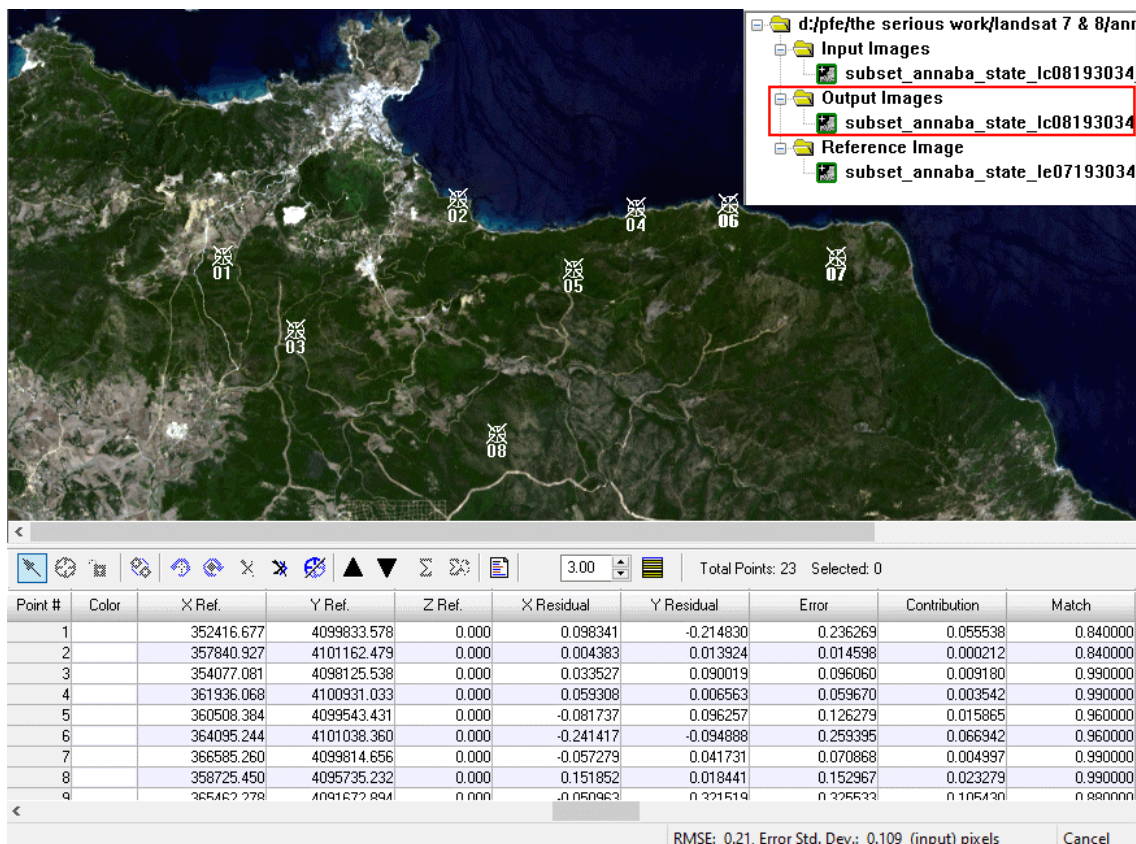


Figure 8. Image de sortie issue de la mise en correspondance d'images Landsat (Interface d'ERDAS IMAGINE AutoSync Workstation)

3.1.5. Transformation d'images

3.1.5.1. Calcul du NDVI

Les équations NDVI sont fournies dans le guide des produits de réflectance de surface Landsat de l'USGS (USGS 2017).

Le NDVI est calculé à partir de données Landsat 7 ETM+ par l'équation suivante :

Équation 7. NDVI-Landsat 7 ETM+

$$NDVI = \frac{\text{Bande 4} - \text{Bande 3}}{\text{Bande 4} + \text{Bande 3}} \quad (7)$$

Le NDVI est calculé à partir de données Landsat 8 OLI/TIRS par l'équation suivante :

Équation 8. NDVI-Landsat 8 OLI/TIRS

$$NDVI = \frac{\text{Bande 5} - \text{Bande 4}}{\text{Bande 5} + \text{Bande 4}} \quad (8)$$

Les calculs ont été effectués à l'aide de l'outil *Raster Calculator* dans le logiciel QGIS, les expressions des équations introduites sont les suivantes :

- NDVI_{Date 1} (Pour l'an 2000)

```
( "Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@4" -
"Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@3" ) / (
"Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@4" +
"Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@3" )
```

- NDVI_{Date 2} (Pour l'an 2015)

```
( "Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@5" -
"Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@4" ) / (
"Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@5" +
"Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@4" )
```

3.1.5.1.1. Calcul de la différence du NDVI

Pour obtenir l'image de différence du NDVI, l'image NDVI de la date antérieure (2000) a été soustraite de l'image NDVI de la date ultérieure (2015) à l'aide de l'équation suivante :

Équation 9. Différence du NDVI

$$NDVI_{diff} = NDVI_{t2} - NDVI_{t1} \quad (9)$$

- Expression du *Raster Calculator* :

```
"NDVI_Date-2_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@1" -
"NDVI_Date-1_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@1"
```

3.1.5.2. Calcul du EBBI

L'EBBI est calculé à partir de données Landsat 7 ETM+ par l'équation suivante (As-syakur et al. 2012) :

Équation 10. EBBI-Landsat 7 ETM+

$$EBBI = \frac{Bande\ 5 - Bande\ 4}{10 \times \sqrt{Bande\ 5 + Bande\ 6\ VCID\ 1}} \quad (10)$$

L'EBBI est calculé à partir de données Landsat 8 OLI/TIRS par l'équation suivante (Sekertekin et Marangoz 2017) :

Équation 11. EBBI-Landsat 8 OLI/TIRS

$$EBBI = \frac{Bande\ 6 - Bande\ 5}{10 \times \sqrt{Bande\ 6 + Bande\ 10}} \quad (11)$$

Les expressions des équations introduites dans l'outil *Raster Calculator* sont les suivantes :

- EBBI_{Date 1} (Pour l'an 2000) :

```
( "Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@5" -
"Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@4" ) / ( 10 * sqrt (
"Subset_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@5" +
"Subset_Annaba_State_LE07_L1TP_193034_20000627_20170211_01_T1_B6_VCID_1_DNs_To_Spectra
l_Radiance@1" ) )
```

- EBBI_{Date 2} (Pour l'an 2015) :

```
( "Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@6" -
"Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@5" ) / ( 10 *
sqrt ( "Subset_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@6" +
"subset_Annaba_State_LC08_L1TP_193034_20150629_20170407_01_T1_B10_DNs_To_Spectral_Radi
ance@1" ) )
```

3.1.5.2.1. Calcul de la différence du EBBI

Pour obtenir l'image de différence du EBBI, l'image EBBI de la date antérieure (2000) a été soustraite de l'image EBBI de la date ultérieure (2015) à l'aide de l'équation suivante :

Équation 12. Différence du EBBI

$$EBBI_{diff} = EBBI_{t2} - EBBI_{t1} \quad (12)$$

- Expression du *Raster Calculator* :

```
"EBBI_Date-2_Annaba_State_LC08193034_20150629_01T1-SC20190731183428_Auto_Sync@1" -
"EBBI_Date-1_Annaba_State_LE071930342000062701T1-SC20190731184956@1"
```

3.2. Données Sentinel-2

3.2.1. Correction atmosphérique

En raison de la disponibilité des données Sentinel-2 de niveau-2A sur notre zone d'étude uniquement à partir de l'an 2018, une correction atmosphérique a été appliquée aux produits de niveau-1C de 2015 pour dériver les produits de niveau-2A associés. Cette correction a été réalisée à l'aide de l'extension Sen2Cor intégré dans le logiciel SNAP de l'ESA, selon les étapes suivantes :

- Chargement du produit de niveau-1C dans SNAP via : *File > Import Optical Sensors > Sentinel-2 > S-2 MSI L1C > MTD_MSIL1C.xml* (le fichier clé des métadonnées du produit, il sert à ouvrir le produit cible).
- Exécution de Sen2Cor via : *Optical > Thematic Land Processing > Sen2Cor*. L'interface de l'extension contient deux onglets : l'onglet *I/O Parameters* est destiné à l'entrée et à la sortie du produit où le produit de sortie sera enregistré dans le même répertoire que celui du produit d'entrée alors que le deuxième onglet *Processing Parameters* sert à entrer les paramètres de traitement :
 - *Resolution > All* : ce paramètre a été sélectionné pour traiter toutes les bandes spectrales de différentes résolutions spatiales.
 - *L2A_GIPP file* : les GIPP sont configurés dans un fichier XML nommé *L2A_GIPP.xml*, situé dans le sous-répertoire du répertoire de base de Sen2Cor. En sélectionnant un GIPP, Sen2Cor effectuera une correction atmosphérique standard.

3.2.2. Extraction des bandes spectrales

Le produit L2A contient 12 bandes spectrales, la bande de cirrus (Bande 10) est omise, car elle ne contient pas d'information de surface.

Le produit source contient d'autres composants que les données d'image (c'est-à-dire les bandes spectrales). Afin de réduire le temps de calcul, les bandes spectrales de différentes résolutions spatiales ont été extraites du produit source comme suit :

- Chargement du produit source dans SNAP via : *File > Import > Optical Sensors > Sentinel-2 > S-2 MSI L2A > MTD_MSIL2A.xml*.
- Exécution de l'opérateur d'extraction via : *Optical > Bands extractor*. Dans l'onglet *Processing Parameters*, les bandes spectrales B1 à B12 ont été sélectionnées. Le processus aboutit à un nouveau produit cible enregistré au format de données BEAM-DIMAP (C'est le format standard dans SNAP qui s'appelle DIMAP, ce dernier a été développé par SPOT Image).

3.2.3. Ré-échantillonnage spatial des bandes spectrales

Le but est de ré-échantillonner les bandes spectrales dans la même résolution spatiale. Cette étape s'effectue comme suit :

- Chargement du produit source issue de l'opération d'extraction dans SNAP
- Exécution de l'opérateur de ré-échantillonnage via : *Raster > Geometric operations > Resampling*. Dans l'onglet *I/O Parameters*, les répertoires d'entrée et de sortie ont été sélectionnés ; le produit source en entrée et le produit cible (ré-échantillonné) en sortie. Au niveau de l'onglet *Processing Parameters*, la résolution spatiale du produit ré-échantillonné a été définie par une taille de pixel de 10 mètres et l'algorithme de ré-échantillonnage, le plus proche voisin (*nearest neighbor*) est défini par défaut. Le produit ré-échantillonné a été enregistré en tant qu'image multibande GeoTIFF.

3.2.4. Mosaïquage

Le mosaïquage consiste à assembler deux ou plusieurs images pour former une seule image radiométriquement équilibrée de telle sorte que les limites entre les images ne soient pas visibles. La création de mosaïques d'images satellites orthorectifiées est une tâche ardue en raison des différences colorimétriques entre les images (tuiles) adjacentes introduites par l'utilisation du sol, l'éclairage de surface, les conditions atmosphériques et le capteur (Cresson et Saint-Geours 2015).

Un produit sentinel-2 consiste en une compilation de deux tuiles, avec une superposition de 10 km des tuiles adjacentes. Afin de découper (extraction) la zone d'intérêt, une opération de mosaïquage doit être effectuée. L'opérateur de mosaïquage du SNAP combine des produits (tuiles) qui se chevauchent en un seul produit composite, en utilisant ce dernier le mosaïquage sera réalisé sur la base du géocodage précis des produits source ; il effectue la fusion de tuiles sans normalisation radiométrique. Il convient de noter qu'avant le mosaïquage, une normalisation radiométrique doit être appliquée aux produits à mosaïquer. En effet, les multiples tentatives de mosaïquage avec cet opérateur n'ont pas été concluantes. En revanche, l'expérimentation de l'extension OTB (Orfeo ToolBox) intégré dans le logiciel QGIS a été satisfaisante. Ci-dessous, les étapes suivies :

- Exécution de l'opérateur de mosaïquage de la boîte à outil Orfeo via : *Processing > Toolbox > OTB > Image Manipulation > Mosaic* ;
- Définition des paramètres de traitement (identifiants) :
 - *Input images* : pour l'entrée des deux images (tuiles) à mosaïquer.
 - *Feathering method* : ce paramètre donne 3 techniques optionnelles *none*, *large* et *slim*. Nous avons choisi la technique « *large blending composition mode* ». Cette technique fusionne les images sur les zones de chevauchement maximum, produisant ainsi des mosaïques homogènes (*seamless mosaicing*), mais peut provoquer un effet de flou lorsque les images ne sont pas parfaitement alignées.

- *Harmonization method* : son objectif est de réaliser une harmonisation radiométrique/colorimétrique. La technique d'harmonisation sélectionnée a été *band-by-band* qui consiste à minimiser une fonction de coût basée sur des statistiques d'images dans les zones de chevauchement, pour chaque bande spectrale indépendamment. Diverses fonctions de coût peuvent être utilisées pour l'harmonisation (la fonction de coût RMSE est par défaut).
- *Output data type* : le type de données *float32* a été sélectionné pour l'image de sortie.
- Les autres identifiants ont été laissés par défaut.

3.2.5. Extraction de la zone d'étude

Cette étape a été réalisée comme expliqué précédemment avec les images Landsat.

3.2.6. Mise en correspondance d'images

Cette étape a été réalisée comme expliqué précédemment avec les images Landsat.

3.2.7. Transformation d'images

3.2.7.1. Calcul du NDVI

Le NDVI a été calculé à partir de données Sentinel-2 MSI par l'équation suivante :

Équation 13. NDVI-Sentinel-2 MSI

$$NDVI = \frac{\text{Bande 8} - \text{Bande 4}}{\text{Bande 8} + \text{Bande 4}} \quad (13)$$

Les expressions des équations introduites dans l'outil *Raster Calculator* sont les suivantes :

- NDVI_{Date 1} (Pour L'an 2015) :

```
( "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20150704T101006_N0204_R022_T32SLF-LG_20150704T101337@8" - "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20150704T101006_N0204_R022_T32SLF-LG_20150704T101337@4" ) / ( "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20150704T101006_N0204_R022_T32SLF-LG_20150704T101337@8" + "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20150704T101006_N0204_R022_T32SLF-LG_20150704T101337@4" )
```

- NDVI_{Date 2} (Pour l'an 2019) :

```
( "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20190723T101031_N0213_R022_T32SLF-LG_20190723T125722_Auto_Sync@8" - "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20190723T101031_N0213_R022_T32SLF-LG_20190723T125722_Auto_Sync@4" ) / ( "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20190723T101031_N0213_R022_T32SLF-LG_20190723T125722_Auto_Sync@8" + "Subset_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20190723T101031_N0213_R022_T32SLF-LG_20190723T125722_Auto_Sync@4" )
```

3.2.7.1.1. Calcul de la différence du NDVI

L'image NDVI à date antérieure (2015) a été soustraite de l'image NDVI à date ultérieure (2019).

- Expression du *Raster Calculator* :

```
"NDVI-T2_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20190723T101031_N0213_R022_T32SLF-  
LG_20190723T125722_Auto_Sync@1" - "NDVI-  
T1_Annaba_State_S2A_MSIL2A_20150704T101006_N0204_R022_T32SLF-LG_20150704T101337@1"
```

En ce qui concerne les données Landsat (ETM+ et OLI/TIRS), nous avons utilisé l'EBBI pour identifier et détecter les changements dans les types d'occupation du sol « sols artificialisés et sols nus ». Comme mentionné précédemment, l'EBBI utilise la bande thermique pour une meilleure détection des sols artificialisés et des sols nus. Par conséquent, cet indice ne peut pas être calculé en utilisant des données Sentinel-2MSI car l'instrument MSI n'inclut pas de capteur infrarouge thermique. Donc, nous avons utilisé les données Sentinel-1 de type complexe à visée simple (SLC) acquises en mode interférométrique (IW) qui permettent d'extraire la cohérence interférométrique. Cette dernière constitue un élément très efficace pour la cartographie des zones urbaines.

4. Traitement de données SAR - Sentinel-1

La procédure d'estimation de la cohérence interférométrique entre deux acquisitions Sentinel-1 C-band SAR IW SLC a été réalisée dans SNAP selon les étapes suivantes :

4.1. Extraction des bursts Sentinel-1 TOPSAR

Ce processus est recommandé lorsque l'analyse est centrée uniquement sur une zone spécifique ce qui permet de réduire le temps d'exécution dans les étapes de traitement qui vont suivre. Dans notre cas, la wilaya d'Annaba est située dans la deuxième sous-fauchée et s'étend surquartebursts. Par conséquent, il n'y a pas besoin de traiter toute la sous-fauchée.

Chaque acquisition Sentinel-1 IW SLC a été traitée individuellement comme suit :

- L'acquisition Sentinel-1 IW SLC a été importée via : *File > Import > SAR Sensors > Sentinel-1 Product.zip* (L'extraction ZIP ne sera pas nécessaire).
- Les bursts Sentinel-1 TOPSAR ont été extraits via : *Radar > Sentinel-1 Tops > S-1 TOPS Split*.

4.2. Application du fichier d'orbite précis

Les vecteurs d'état d'orbite (*orbit state vectors*) fournis dans les métadonnées d'un produit SAR ne sont généralement pas précis et peuvent être affinés avec les éphémérides (fichiers d'orbite) précises, disponibles plusieurs jours après la génération du produit. Les éphémérides fournissent des informations précises sur la position et la vitesse du satellite à tout instant. Sur la base de ces informations, les vecteurs d'état d'orbite dans les métadonnées abstraites du produit sont mis à jour. L'application a été réalisée comme suit :

- Le fichier d'orbite précis a été appliqué individuellement à chaque produit issu de l'étape précédente (i.e. utilisé en entrée de données) via : *Radar > Apply Orbit File*. Dans l'onglet *Processing parameters*, nous avons conservé les paramètres par défaut et l'option *Do not fail if new orbit file is not found* (n'échouez pas si le nouveau fichier d'orbite n'est pas trouvé) a été cochée.

4.3. Mise en correspondance d'images

Cette étape a été réalisée en utilisant l'opérateur Sentinel-1 Back Geocoding. Ce dernier met en correspondance deux produits S-1 SLC séparés (maître et esclave) de la même sous-fauchée en utilisant les orbites des deux produits et un modèle numérique d'élévation (MNE). L'application a été effectuée comme suit :

- L'opérateur a été exécuté via : *Radar > Coregistration > S1 TOPS Coregistration > S-1 Back Geocoding*. L'interface comprend trois onglets : *ProductSet-Reader*, *Back-Geocoding* et *Write* (répertoire de sortie) ;
- Dans l'onglet *ProductSet-Reader*, les deux ensembles de produits ont été entrés ; le produit maître (première acquisition) et l'esclave (deuxième acquisition).
- Dans l'onglet *Back-Geocoding*, certains paramètres ont été laissés par défaut et d'autres ont été définis :
 - *Digital Elevation Model* (par défaut) : le *MNESRTM 3sec* est réglé par défaut ;
 - *Resampling Type* (défini) : la méthode d'interpolation *BISINIC 5 POINT* a été utilisée.
 - *Mask out areas with no elevation* : cette option a été cochée pour masquer les zones sans élévation. Elle est recommandée afin d'éviter les artefacts le long de la côte dans les images mises en correspondance.
 - *Output Deramp and Demod Phase* : cette option a été cochée, cela signifie que l'interpolation des phases *deramping* et *demodulation* en utilisant les décalages (*offsets*) de la distance en portée et de l'azimut, doit être sortie sous forme de bandes séparées. Cette option est principalement à des fins de débogage.

4.4. Enhanced Spectral Diversity

L'opérateur Enhanced Spectral Diversity (ESD) estime d'abord le décalage constant de la distance en portée pour l'ensemble de la sous-fauchée de l'image SLC divisée en *bursts*, par l'utilisation d'une corrélation-croisée incohérente (*incoherent cross-correlation*). Ensuite, il estime le décalage constant de l'azimut pour l'ensemble de la sous-fauchée en utilisant la méthode ESD. Enfin, il effectue les corrections de la distance en portée et de l'azimut pour chaque *burst* en utilisant les décalages précédemment estimés (en faisant la moyenne de toutes les estimations). Ci-dessous, les étapes suivies :

- L'opérateur a été exécuté via : *Radar > Coregistration > S-1 TOPS coregistration > Enhanced-Spectral-Diversity* ;
- Les paramètres de traitement ont été laissés par défaut.

4.5. Estimation de la cohérence

L'opérateur *Coherence Estimation* calcule/estime l'image de cohérence à partir d'un ensemble de deux ou plusieurs images complexes mises en correspondance et fusionnées. Ci-dessous, le mode opératoire :

- Exécution de l'opérateur via : *Radar > Interferometric > Products > Coherence* ;
- Les paramètres de l'outil ont été définis comme suit :
 - L'option *Subtract flat-earth phase* a été cochée ;
 - *Coherence Range Window Size* : la taille de la fenêtre de la distance en portée (*range*) de l'image de cohérence a été définie sur 20 m ;
 - *Coherence Azimuth Window Size* : la taille de la fenêtre d'azimut (*azimuth*) de l'image de cohérence a une valeur par défaut égale à 5 m.

En mode interférométrique la résolution spatiale est de 5×20 m (azimut \times distance en portée).

4.6. Fusionnement des bursts

L'opérateur *TOPSAR-Deburst* fusionne les *bursts* adjacents en une seule image. En mode IW, un *burst* focalisé a une durée de 2,75 secondes et un chevauchement des *bursts* d'environ 50 à 100 échantillons. Les images des *bursts* dans les sous-fauchées d'un produit IW SLC sont rééchantillonnées sur une grille commune d'espacement des pixels en distance de portée et en azimut. La synchronisation des *bursts* est alors assurée.

- Exécution de l'opérateur via : *Radar > Sentinel-1 TOPS > TOPSAR-Deburst* ;
- Les paramètres de l'opération ont été laissés par défaut.

4.7. Traitement multivisé

Une image SAR contient du bruit dit chatoiement ou speckle inhérent. Le mode de traitement multivisé a été appliqué à ce moment afin de réduire l'aspect de chatoiement et de faciliter l'interprétation de l'image. Ci-dessous, les étapes suivies :

- Exécution de l'opérateur via : *Radar > SAR utilities > Multilooking* ;
- Les paramètres par défaut ont été conservés.

4.8. Correction de terrain

Nos données sont encore dans la géométrie radar. De plus, en raison des variations topographiques d'une scène et de l'inclinaison du capteur-satellite, les distances peuvent être déformées dans les images SAR. Par conséquent, une correction de terrain a été appliquée pour compenser les distorsions et de projeter la scène en projection cartographique.

La géométrie des distorsions topographiques dans les images SAR est présentée ci-dessous (fig.9). Nous pouvons voir ici que le point B avec l'élévation h au-dessus de l'ellipsoïde est imagé à la position B' dans l'image SAR, bien que sa position réelle soit B'' . Le décalage Δr entre B' et B'' montre l'effet des déformations topographiques.

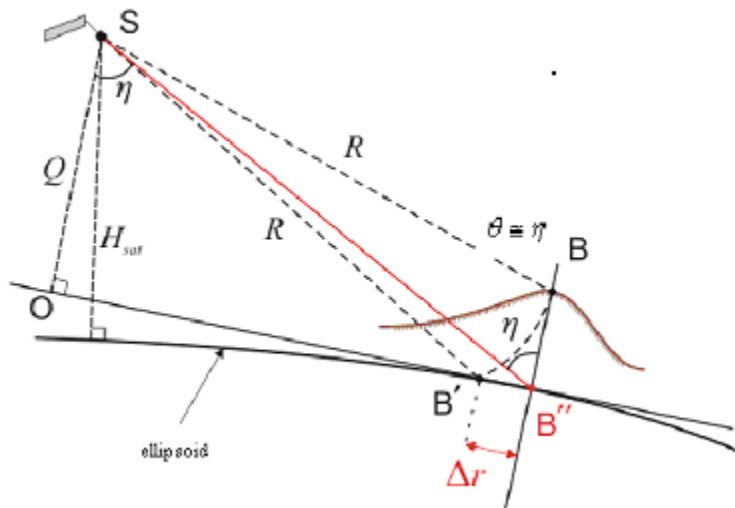


Figure 9. Géométrie des distorsions topographiques dans les images SAR (Source : ESA SNAP help contents).

- Exécution de l'opérateur via : *Radar > Geometric > Terrain Correction > Range-Doppler Terrain Correction* ;
- Les paramètres de l'outil ont été définis comme suit :
 - *Pixel Spacing* : la taille du pixel étant réelle (14 m avec des valeurs décimales), elle a donc été arrondie à 15 m. Les deux images de cohérence obtenues ont une résolution spatiale de 15 m ;
 - *Map Projection* : la projection cartographique est automatiquement détectée (UTM/WGS 84).

4.9. Extraction de la zone d'étude

L'étendue spatiale du produit résultant doit être réduite pour se focaliser sur la zone d'étude en créant un sous-ensemble spatial (*spatial subset*) à partir de chaque image de cohérence (de 2015 et de 2019). L'opération a été effectuée à l'aide de l'outil *Graph Builder* en établissant une simple chaîne de traitement pour l'opérateur « *Subset* » où le produit résultant de l'opération précédente a été sélectionné en entrée (*input*) et l'opération *subset* a été effectuée en mettant à jour les coordonnées géographiques du produit d'entrée, ces dernières ont été remplacées par les coordonnées de délimitation qui définissent l'étendue spatiale de la wilaya d'Annaba copiées à partir du fichier WKT (*Well-Known Text*) de la wilaya d'Annaba. WKT est un format standard en mode texte utilisé pour représenter des objets géométriques vectoriels.

Après avoir exécuté cette chaîne de traitement, le logiciel ajoute le nom abrégé de chaque étape au produit final. Le produit final contient deux bandes de cohérence en polarisations VH et VV comme indiqué ci-dessous :

- Pour l'an 2015 :

```
S1A_IW_SLC__1SDV_20150601T172840_20150601T172907_006183_0080D8_87DB_split_Orb_Stack_es
d_coh_deb_ML_TC_Subset-Annaba :
```

- coh_IW2_VH_01Jun2015_13Jun2015
- coh_IW2_VV_01Jun2015_13Jun2015

- Pour l'an 2019 :

```
S1A_IW_SLC__1SDV_20190604T172859_20190604T172926_027533_031B63_E27B_split_Orb_Stack_es
d_coh_deb_ML_TC_Subset-Annaba :
```

- coh_IW2_VH_04Jun2019_16Jun2019
- coh_IW2_VV_04Jun2019_16Jun2019

5. Caractéristiques des images résultantes

5.1. Images de différence d'indice spectral

Ci-dessous, les caractéristiques d'images des différences calculées :

- Image de différence du NDVI : généralement, les valeurs de pixel positives indiquent une augmentation du couvert végétal et les valeurs négatives indiquent une diminution du couvert végétal. En revanche, les valeurs autour de zéro représentent l'absence de changement dans le paysage.
- Image de différence du EBBI : les valeurs de pixel positives indiquent une augmentation dans les types d'occupation du sol « sols artificialisés et sols nus ». Tandis que, les valeurs négatives indiquent une augmentation du couvert végétal et les valeurs autour de zéro ne représentent aucun changement dans le paysage.

5.2. Images de cohérence

Dans une image de cohérence interférométrique, chaque pixel est représenté par une valeur comprise entre 0 et 1. Les faibles valeurs indiquent l'incohérence (i.e., changement de la surface terrestre au fil du temps) tandis que, les valeurs élevées indiquent la cohérence (i.e., pas de changement de surface au fil du temps).

Vu que, les zones urbaines et les montagnes dénudées ont des valeurs de cohérence élevées. D'autre part, les zones forestières, les terrains agricoles et les plans d'eau ont des faibles valeurs de cohérence. La figure ci-dessous représente les images de cohérence en polarisation VV de la wilaya d'Annaba en 2015 et en 2019 liées géométriquement en mode horizontal. Les histogrammes relatifs à chaque bande VV sont également représentés. Les zones urbaines apparaissent en gris (valeurs de cohérence élevées).

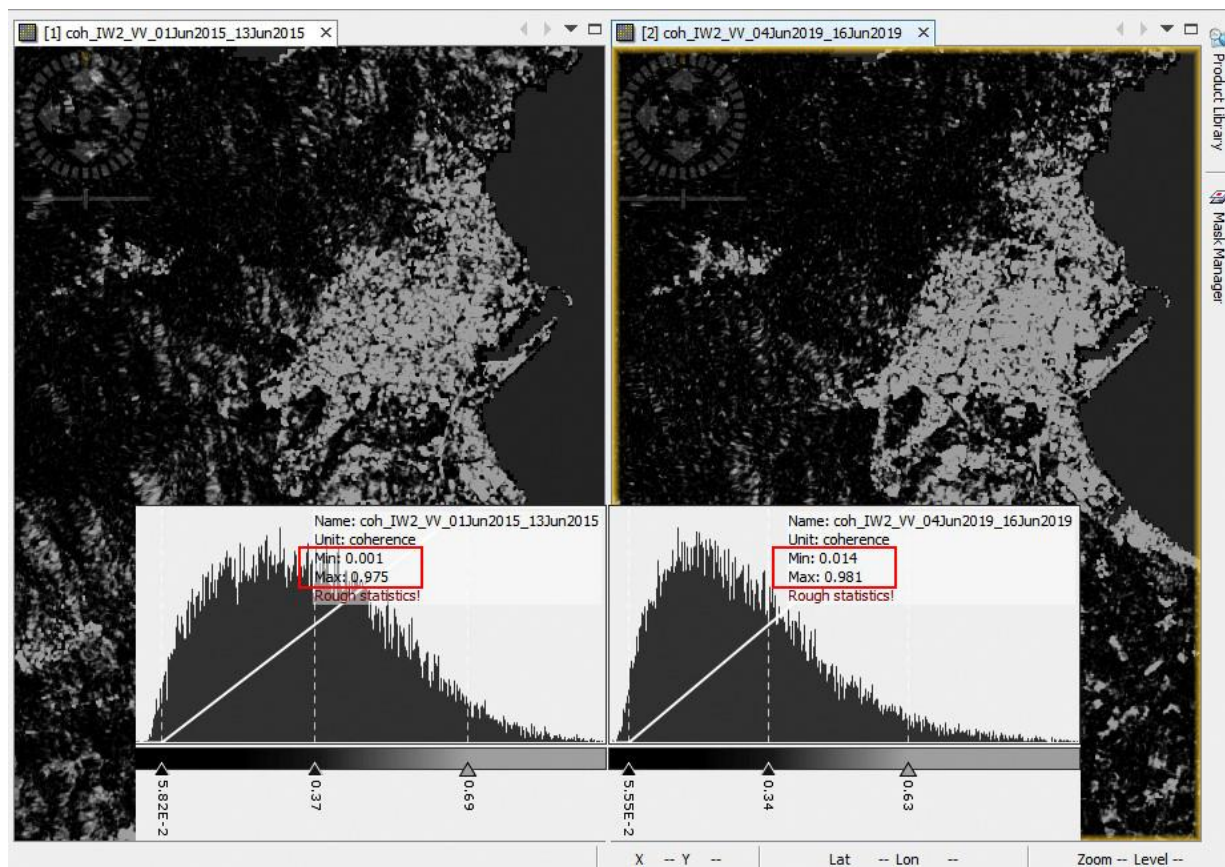


Figure 10. Images de cohérence interférométrique de la wilaya d'Annaba, à gauche en 2015, à droite en 2019 (Interface du logiciel SNAP)

6. Estimation du changement

6.1. Image de différence du EBBI

L'image de la différence du EBBI met en évidence les zones où le changement a eu lieu et aussi renseigne sur son type. L'objectif de notre étude est de détecter le changement mais aussi de le quantifier. Pour ce faire, nous avons opté pour une classification supervisée afin d'estimer le changement en focalisant sur les valeurs élevées (positives) qui indiquent l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus.

Notre choix s'est porté sur la classification de l'image de la différence du EBBI plutôt que celle du NDVI en raison que, le NDVI caractérise la modification de l'activité photosynthétique du couvert végétal liée au changement du type, d'abondance, et/ou d'état des végétaux, il est donc largement utilisé pour la cartographie de la répartition de la végétation ainsi qu'une variété de conditions sur les surfaces terrestres. Tandis que, l'EBBI s'avère efficace pour la cartographie des sols artificialisés et des sols nus par rapport à d'autres indices spectraux précédemment utilisés à cet égard (NDBI, IBI, UI, NDBaI et NDVI). En effet, les résultats de l'estimation des sols artificialisés et des sols nus par l'utilisation de l'EBBI appliqué aux images Landsat 7 ETM+ ont été comparés à ceux issus de la classification d'images IKONOS (images à haute résolution spatiale) ont montré un degré de précision assez appréciable (As-syakur et al. 2012).

6.1.1. Extraction des communes côtières

L'image de la différence du EBBI couvre l'ensemble du domaine de la wilaya d'Annaba. En utilisant les shapefiles (polygones) des limites administratives de chacune des communes côtières, un sous-ensemble spatial a été créé pour chaque commune côtière (extraction par masque). Cela a pour but de faciliter la création des sites (zones) d'entraînement pour l'algorithme de classification.

L'extraction par masque pour chacune des communes côtières est également avantageux dans la mesure où chaque commune a été traitée comme un domaine d'intérêt, ce qui permet de mieux cibler les aspects techniques lors de la classification.

6.1.2. Sites d'entraînement

L'image de la différence du EBBI est une image à bande unique en niveaux de gris. Pour afficher l'image en équidensité colorée, le type de rendu pseudocouleur à bande unique a été appliqué et les valeurs Min/Max de l'histogramme ont été réglées à $\pm 1,5$ de l'écart type par rapport à la moyenne afin de mettre en évidence le changement subtil où la palette de couleur est linéairement interpolée pour attribuer différentes couleurs aux valeurs de l'histogramme. Etant donné que la classification vise à estimer le changement qui est représenté par les valeurs positives les plus élevées ; pour mettre en évidence les pixels de ces valeurs nous avons utilisé une astuce qui consiste à attribuer une couleur à ces pixels, ainsi qu'une autre couleur pour les pixels des autres valeurs. Comme le montre la figure 11 ci-dessous, le bleu met en évidence les pixels ayant la valeur la plus élevée tandis que, le noir met en évidence les autres valeurs. Par conséquent, deux classes ont été définies :

- La classe étiquetée « EBBI élevé », représente les valeurs élevées de la différence du EBBI ;
- La classe étiquetée « Autres valeurs », représente les autres valeurs de la différence du EBBI.

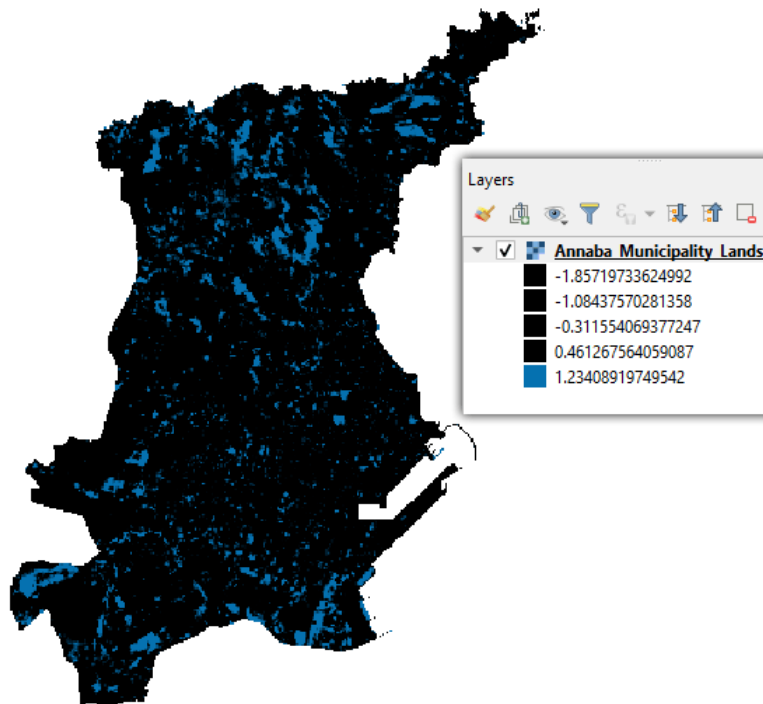


Figure 11. Application d'une échelle de couleurs à l'image de la différence du EBBI de la commune d'Annaba (Interface du logiciel QGIS)

Deux ensembles d'échantillonnage indépendants servant à classer l'ensemble de l'image ont été numérisés. Chaque ensemble consiste en un groupe de polygones numérisés sur les pixels ciblés (valeurs les plus élevées ou autres valeurs), ces polygones (sites d'entraînement) sont groupés dans une couche shapefile de type polygone. De ce fait, deux couches représentant les classes identifiées (EBBI élevé et Autres valeurs) ont été créées à l'aide du logiciel QGIS via *Layer > Create new shapefile layer* :

- Définition des propriétés des couches shapefile :
 - Le type de géométrie : polygone.
 - La projection cartographique : WGS/UTM Zone 32 Nord.
- Numérisation des polygones :
 - Pour la classe étiquetée « EBBI élevé » : en activant l'option « *toggle editing* », nous avons numérisé de petits polygones sur les pixels ayant les valeurs positives les plus élevées. Ensuite, à l'aide de l'outil « *add polygon features* » ces polygones ont été ajoutés à la couche shapefile « EBBI élevé ». Comme le montre la figure 12 ci-dessous ; le polygone d'échantillonnage s'affiche en bordure rouge.
 - Pour la classe étiquetée « Autres valeurs » : en suivant les mêmes étapes que précédemment, les polygones ont été numérisés sur les autres pixels et ajoutés à la couche shapefile « Autres valeurs ».

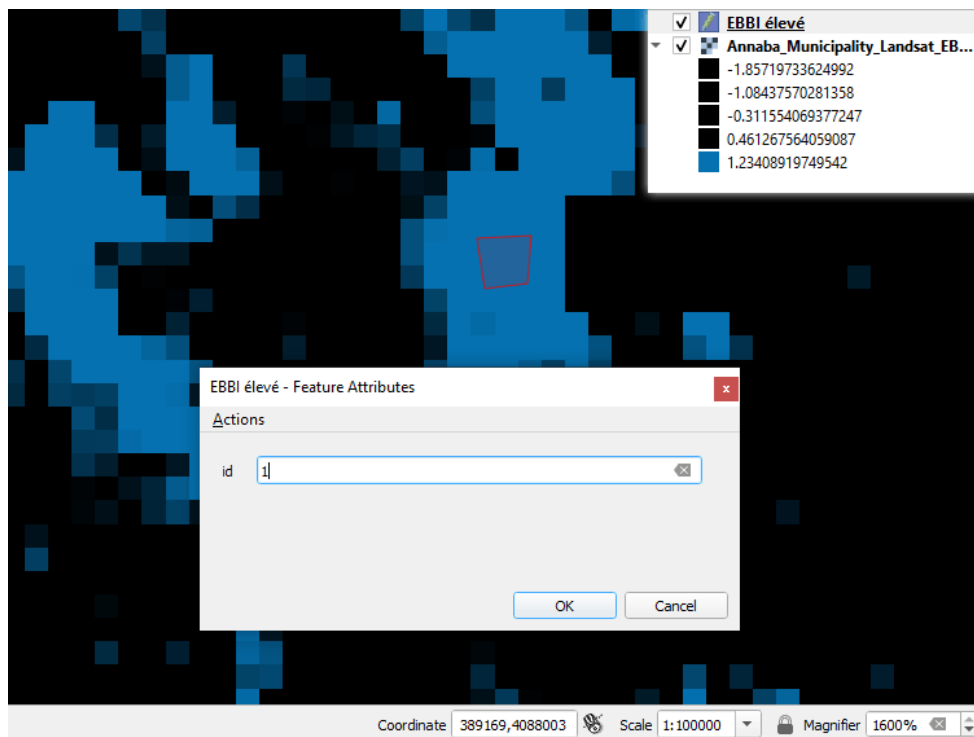


Figure 12. Numérisation des sites (zones) d'entraînement sur l'image de la différence du EBDI entre 2000 et 2015 de la wilaya d'Annaba (Interface du logiciel QGIS).

6.2. Images de cohérence

En fonction de la cohérence interférométrique, les valeurs élevées désignent les zones urbaines ainsi que les montagnes dénudées (sols nus à des altitudes élevées). D'autre part, les faibles valeurs indiquent autres types d'occupation du sol, en raison du fait que le signal provenant des zones urbaines et des montagnes dénudées peut conserver sa cohérence pendant de nombreuses années ; en particulier les zones urbaines, sont très stables et il est peu probable qu'un sol bâti change de position ou de forme. Par ailleurs, nous pouvons constater que les zones à végétation clairsemée et les champs agricoles ont une cohérence élevée lorsque les acquisitions sont en tandem avec un intervalle d'un jour, mais si l'intervalle est supérieur à quelques jours, la cohérence observée est bien inférieure. D'autre part, les zones forestières et les bassins hydrographiques ne montrent pas un niveau de cohérence suffisant même dans un intervalle d'un jour (Serco Italia SPA 2018).

Dans notre cas, les images de cohérence pour les deux dates (2015 et 2019), ont été estimées entre deux acquisitions à un intervalle de 12 jours afin de distinguer les zones urbaines d'autres types d'occupation du sol. La classification supervisée a été menée pour la cartographie des zones urbaines en 2015 et en 2019. Ensuite, la comparaison des classifications a été suivie afin d'estimer le changement survenu.

6.2.1. Extraction des communes côtières

Un sous-ensemble spatial a été créé pour chaque commune côtière (extraction par masque) pour faciliter la création des sites d'entraînement.

6.2.2. Sites d'entraînement

Comme nous l'avons fait auparavant avec l'image de la différence du EBBI, nous devons isoler les pixels à faibles valeurs de cohérence et ne mettre en surbrillance que les pixels à cohérence élevée. Nous avons numérisé les polygones d'entraînement sur ces pixels où tous les polygones ont été ajoutés à la couche shapefile « Cohérence élevée ». De même, d'autres polygones ont été numérisés sur les autres pixels et attribués à la couche shapefile « Faible cohérence ». Par conséquent, deux classes ont été identifiées :

- La classe étiquetée « Cohérence élevée ».
- La classe étiquetée « Faible cohérence ».

6.3. Classification supervisée d'images

La classification supervisée par l'algorithme des forêts aléatoires intégré dans le logiciel SNAP a été effectuée sur les images de la différence du EBBI (entre 2000 et 2015) et sur les images de cohérence (de 2015 et de 2019). Ci-dessous les étapes suivies :

- Chargement du produit à classé ;
- Chargement des données d'entraînement via : `Vector > import > ESRI Shapefile` ;
- Exécution de l'opérateur `Random Forest Classifier` via : `Raster > Classification > Supervised Classification > Random Forest Classifier` ;
- Le nombre d'arbres de décision a été réglé sur 500.

7. Traitement des données MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT), en anglais *Digital Elevation Model (DEM)*, est une cartographie de l'élévation du sol nu. C'est un ensemble de relevés d'altitudes suivant les points d'une grille. Ces relevés sont faits depuis des satellites ou des avions à l'aide de radar, de laser (*LiDAR*) ou de photographies stéréoscopiques (Rodrigo 2019).

Les MNT sont distribuées à l'échelle nationale par l'institut national de cartographie et de télédétection (INCT) et à l'échelle internationale par quelques agences cartographiques américaines principalement, grâce aux subventions dont elles disposent. Ces dernières mettent

gratuitement à la disposition du public des bases de données importantes, accessibles sur le Web. Les principaux distributeurs sont la NASA, la NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*) et l'USGS.

Nous avons opté pour l'utilisation de la version 3 du GDEM (*Global Digital Elevation Model*) de l'instrument ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). L'ASTER GDEM version 3a a été publié le 05 août 2019.

L'ASTER GDEM V.3 est disponible gratuitement aux utilisateurs à l'échelle mondiale par téléchargement à partir des sites web du « *Japan Space Systems* » et du « *Land Processes Distributed Active Archive Center -LP DAAC* » de la NASA.

Les produits ASTER GDEM V.3 sont distribués au format d'image GeoTIFF avec une résolution spatiale de 30 m. Ils sont référencés au géoïde WGS84/EGM96 avec les coordonnées géographiques latitude/longitude (NASA and METI Science Teams 2019).

La wilaya d'Annaba est couverte par deux tuiles selon les coordonnées ; latitude N36/longitude E007 et latitude N37/longitude E007.

Les données ont été téléchargées à partir du site web du *Japan Space Systems* (https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html).

Le produit contient deux ensembles de données :

- ASTGTMV003 : le produit raster MNT (Tuile MNT).
- ASTWBDV001 : le produit raster de plans d'eau en tant qu'océan, mer, rivière ou lac.

Un MNT permet de reconstituer une vue en images de synthèse du terrain pour créer un fond de carte représentant le relief du terrain ; sur une carte les données d'un MNT ajoutent du réalisme. La couche MNT a été traitée dans le logiciel ArcMap en suivant ces étapes :

- Chargement des deux tuiles MNT (ASTGTMV003_N36E007_dem.tif et ASTGTMV003_N37E007_dem.tif) dans le logiciel ArcMap ;
- Mosaïquage des deux tuiles MNT à l'aide de l'opérateur de mosaïquage qui est accessible via : *ArcToolbox > Data Management Tools > Raster Dataset > Mosaic*, les paramètres ont été laissés par-default ;
- Projection du raster mosaïqué vers WGS 84/UTM Zone 32N à l'aide de l'outil « *Project* » accessible via : *ArcToolbox > Data Management Tools > Projections and transformations > Project* ;
- Découpage du raster mosaïqué pour extraire la wilaya d'Annaba et les cinq communes côtières à l'aide de l'outil « *Extract by Mask* », accessible via : *ArcToolbox > Spatial Analyst*

Tools ArcToolbox > Extraction > Extract by Mask, les données de masque utilisées sont les shapefiles des limites administratives ;

- Création d'une surface TIN à partir du MNT mosaïqué. La conversion en TIN (*Triangulated Irregular Network*, en français Réseau Triangulé Irrégulier) permet de représenter la morphologie de surface pour simplifier la visualisation du MNT. L'outil « *Raster To TIN* » permet de créer un TIN à partir d'un raster MNT en entrée. Cet outil est accessible via : *ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Conversion > Raster To TIN*, les paramètres ont été laissés par-default.

Chapitre IV

Résultats et Interprétations

1. Résultats du traitement des couches SIG vecteur

Les tableaux (13 et 14) résument les superficies et les longueurs calculées à partir de l'ajout des attributs géométriques aux tables attributaires des couches SIG vecteur des limites administratives, du trait de côte et des bandes littorales de la wilaya d'Annaba et de ses communes côtières :

Tableau 13. Résultats du traitement des couches SIG vecteur de la wilaya d'Annaba

Wilaya d'Annaba	Superficie (km ²)	Linéaire côtier (km)	Superficies des bandes littorales (km ²)			
			De 100 m	De 300 m	De 800 m	De 3 km
	1404.10	123.79	10.15	26.85	62.90	199.20

Tableau 14. Résultats du traitement des couches SIG vecteur des communes côtières d'Annaba

Commune	Superficie (km ²)	Linéaire côtier (km)	Superficies des bandes littorales (km ²)			
			De 100 m	De 300 m	De 800 m	De 3 km
Annaba	47.74	37.42	2.89	7.28	15.54	36.83
El Bouni	93.25	7.78	0.6	1.77	5.04	26.33
Oued El Aneb	189.42	5	0.48	1.42	3.66	13.01
Seraïdi	136.22	32.76	2.79	7.28	17.42	60.27
Chetaïbi	131.28	40.81	3.37	9.06	21.20	61.79

Les figures 13, 14, 15, 16 et 17 représentent les bandes littorales (100, 300, 800m et 3km) des communes côtières de la wilaya d'Annaba :

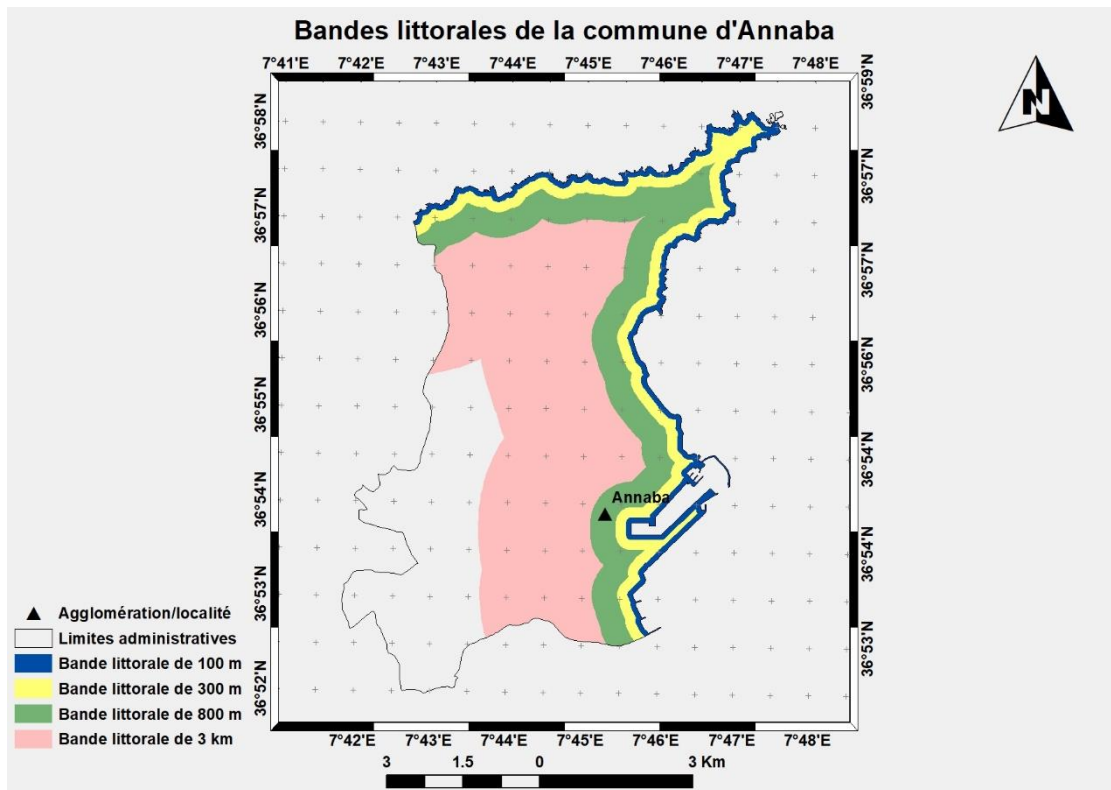


Figure 13. Carte des bandes littorales de la commune d'Annaba

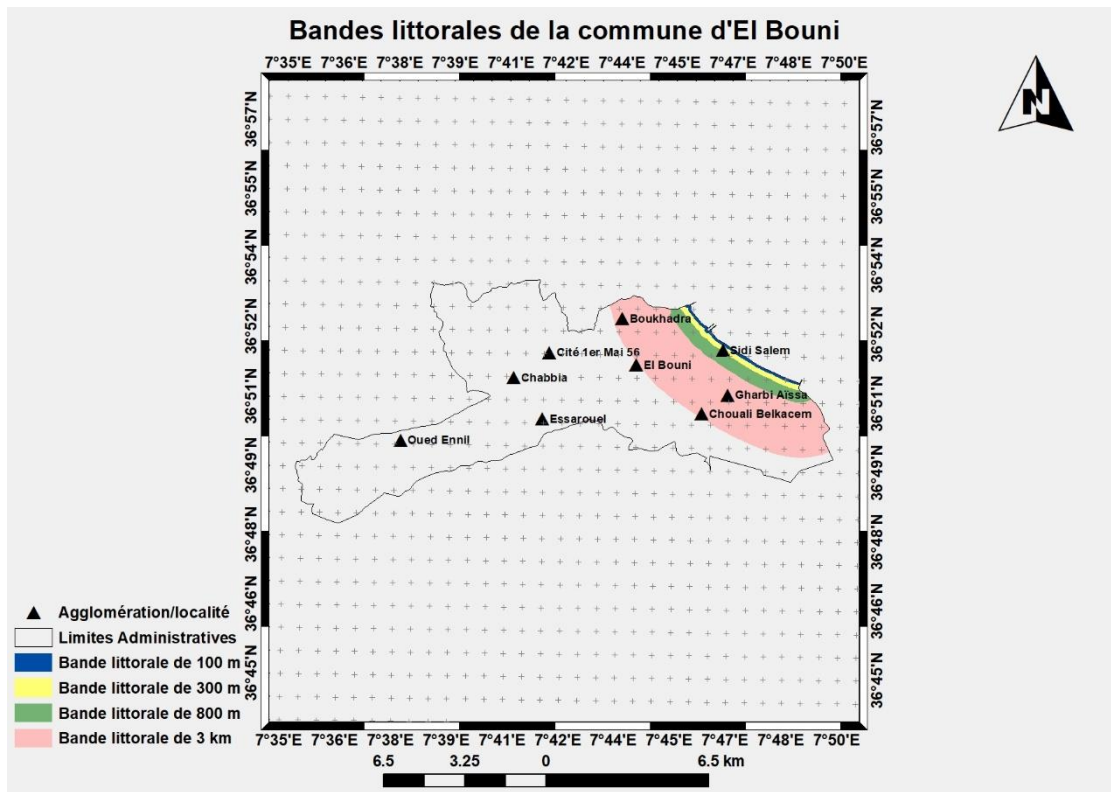


Figure 14. Carte des bandes littorales de la commune d'El Bouni

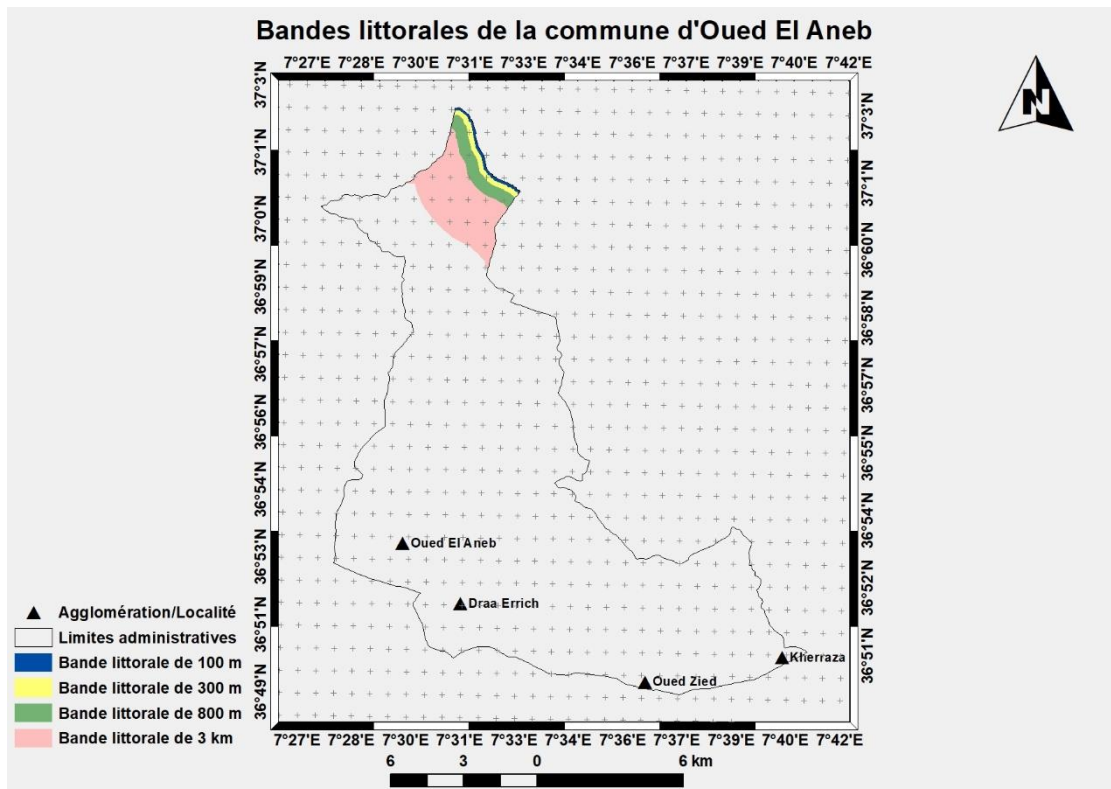


Figure 15. Carte des bandes littorales de la commune d'Oued El Aneb

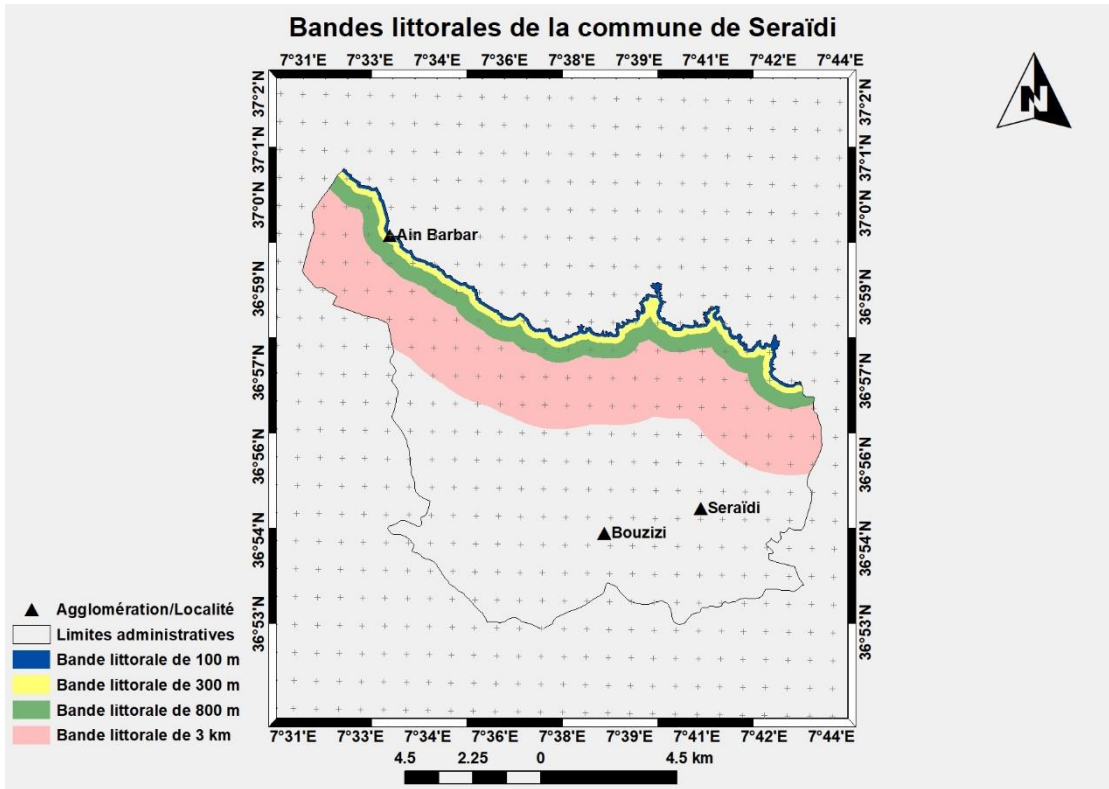


Figure 16. Carte des bandes littorales de la commune de Seraïdi

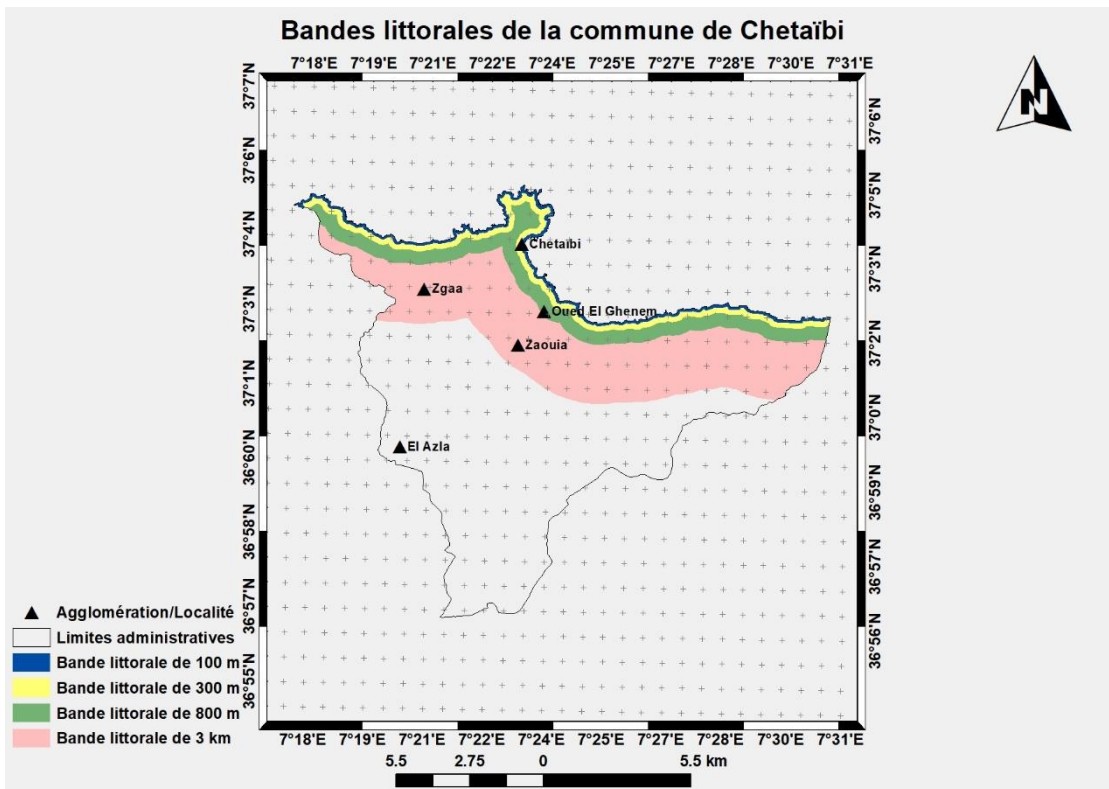


Figure 17. Carte des bandes littorales de la commune de Chetaïbi

2. Résultats et analyse du changement

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats ainsi qu'une interprétation basée sur une analyse qualitative et une analyse quantitative.

L'analyse qualitative est basée sur la photo-interprétation d'images des différences d'indices spectraux (NDVI et EBBI). Concernant la différence du NDVI (dNDVI), les zones en vert correspondent à des valeurs de pixels positives indiquant un NDVI élevé. Cela veut dire que les valeurs NDVI de l'image ultérieure (de 2015 ou de 2019) sont supérieures à celles de l'image antérieure (de 2000 ou de 2015). Selon Jensen et al. (2012), un NDVI élevé indique une augmentation du couvert végétal ou une baisse du niveau de l'eau. Par ailleurs, les zones en rouge correspondent à des valeurs de pixels négatives indiquant un faible NDVI, cela s'explique par une diminution du couvert végétal à la date ultérieure (de 2015 ou de 2019) ou une augmentation du niveau de l'eau. Les valeurs NDVI de l'image antérieure sont alors supérieures à celles de l'image ultérieure. En effet, le NDVI diminue considérablement après l'élimination de la biomasse verte pouvant être causée par le feu, la coupe à blanc des forêts ou l'artificialisation des sols. Enfin, les valeurs autour de zéro (en jaune) représentent l'absence de changement dans le paysage parce que les deux images ont approximativement les mêmes valeurs du NDVI.

D'autre part, dans la différence du EBBI (dEBBI), les zones en bleu révèlent un EBBI élevé (valeurs de pixels positives) indiquant l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus à la date ultérieure (2015), due probablement à l'artificialisation des sols. Par ailleurs, les zones en marron indiquent un faible EBBI (valeurs de pixels négatives), ce qui signifie une augmentation de la végétation. Néanmoins, ceci a été vérifié à partir de la différence-NDVI. En effet, l'observation de l'image dEBBI montre bien que les zones en marron prennent la couleur verte dans l'image dNDVI. Enfin, les valeurs autour de zéro (en beige) ne représentent aucun changement dans le paysage.

L'observation des valeurs négatives (faibles) de la différence du NDVI et des valeurs positives (élevées) de celle du EBBI a donné des indications sur le changement qui nous intéresse ; les faibles valeurs de la dNDVI et les valeurs élevées de la dEBBI sont presque équivalentes. En effet, le rouge (faibles valeurs) dans l'image dNDVI correspond presque entièrement au bleu (valeurs élevées) dans l'image dEBBI ; cela indique que la diminution du couvert végétal était peut-être liée à l'artificialisation des sols.

L'analyse quantitative entre 2000 et 2015 est basée sur la classification supervisée de la différence-EBBI où le changement a été quantifié en fonction de leurs valeurs élevées indiquant l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus. D'autre part, entre 2015 et 2019 cette analyse repose sur la comparaison des classifications d'images de cohérence (de 2015 et de 2019), en se basant sur le fait que les zones urbaines ont des valeurs de cohérence élevées, ces valeurs ont été quantifiées pour les deux dates et leurs résultats ont été comparés pour estimer le changement.

Il est à noter que, les valeurs élevées de la cohérence interférométrique indiquent aussi les montagnes dénudées et c'est grâce au MNT que ce cas particulier a été clarifié afin d'écarter toute confusion lors de l'interprétation qualitative des résultats.

Les résultats obtenus montrent que la couche de cohérence a été satisfaisante pour l'estimation de la superficie et l'évolution des zones urbaines sans complexités, dans le cas des communes d'Annaba et d'El Bouni qui se caractérisent par une topographie assez plate (i.e., les terres plates sont largement réparties) tandis que, dans le cas des communes d'Oued El Aneb, de Seraïdi et de Chetaïbi où le relief montagneux est prédominant (massif de l'Edough), ces résultats ont une complexité en raison de la présence de vastes zones montagneuses dénudées (i.e., sols nus à des altitudes élevées). Afin d'estimer la superficie et l'évolution des zones urbaines dans ce cas particulier, certaines astuces ont été utilisées. En revanche, ce facteur d'élévation était avantageux en ce qui concerne les activités d'artificialisation des sols, car si une zone montagneuse passe de l'état boisée (couvert d'arbres ou couvert forestier) à l'état dénudée (nues) pour une raison quelconque (e.g., coupe à blanc, exploitation minière, incendies, ...etc.), nous pouvons détecter et estimer ce changement selon la cohérence interférométrique car les couverts forestiers ont des faibles valeurs de cohérence.

Les compositions colorées « urbain fausses couleurs » et « végétation saine » ont été réalisées afin de révéler visuellement quelques confusions sur les résultats et pour une photo-interprétation plus pratique du changement. En effet, ces compositions sont utiles pour la visualisation des milieux urbains (sols bâtis et sols revêtus), des sols nus et de la végétation. Le principe d'une composition colorée consiste à affecter aux trois canaux de couleurs primaires rouge, vert et bleu (RVB), trois bandes spectrales d'une même image en particulier. La composition colorée « urbain fausses couleurs » utilise les bandes spectrales IRCL-1, IRCL-2 et Rouge tandis que, la composition colorée « végétation saine » utilise les bandes spectrales PIR, IRCL-1 et Blue (Butler 2013). Le tableau 15 résume les bandes spectrales à affecter aux canaux rouge, vert et bleu en fonction des capteurs ETM+, OLI et MSI pour les deux compositions colorées.

Tableau 15. Compositions colorées « urbain fausses couleurs » et « végétation saine » pour ETM+, OLI et MSI

Compositions colorées	urbain fausses couleurs			végétation saine		
	Bandes spectrales à affecter au RVB					
Capteurs	R	V	B	R	V	B
Landsat 7 ETM+	Bande 7	Bande 5	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 1
Landsat 8 OLI	Bande 7	Bande 6	Bande 4	Bande 5	Bande 6	Bande 2
Sentinel-2 MSI	Bande 12	Bande 11	Bande 4	Bande 8	Bande 11	Bande 2

2.1. Commune d'Annaba

2.1.1. Changement entre 2000 et 2015

2.1.1.1. Analyse qualitative

L'analyse ciblée du changement survenu dans la commune d'Annaba entre 2000 et 2015 (Figs. 20 et 21) nécessite quelques éléments clés afin de mener à bien ce processus et de donner une confirmation basée sur l'appréciation visuelle. D'abord, nous avons réalisé la composition colorée « urbain fausses couleurs » pour les deux dates 2000 et 2015 respectivement (Fig. 18-A et Fig. 18-B). Le milieu urbain y apparaît principalement en violet et en blanc. Le trait en rouge numérisé à partir de la couche « Parks/Recreation Areas » de Google Earth indique les limites du périmètre de l'aire naturelle du massif de l'Edough, l'utilisation de cette couche permet de délimiter l'espace urbain de l'espace naturel.

L'élévation du terrain varie de 0 à 521 mètres et augmente considérablement de l'est vers l'ouest. Les plaines (0 à 57 mètres) s'étendent largement de la côte est au sud-ouest jusqu'au approximativement le centre de la région. La partie nord est aussi ouverte à la mer Méditerranée, cette partie est caractérisée par un relief montagneux (Mont de l'Edough), dans laquelle l'élévation varie de 115 à 405 mètres (voir annexe 11).

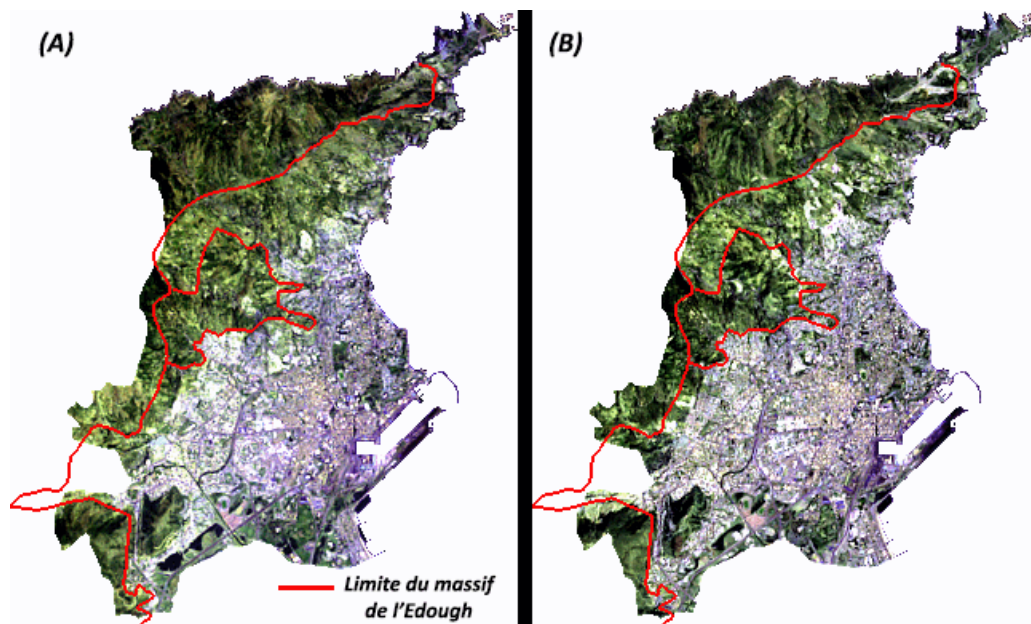


Figure 18. Composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune d'Annaba. (A) du 27 juin 2000 acquise par Landsat 7 ETM+, (B) du 29 juin 2015 acquise par Landsat 8 OLI/TIRS, le trait rouge matérialise les limites du massif de l'Edough numérisé à partir de Google Earth Pro

La figure 19 représente la carte des POS (Plan d'Occupation des Sols) prescrits par le projet du PDAU (Plan Directeur D'aménagement et d'Urbanisme) à date récente de la ville d'Annaba. Le périmètre urbain y est marqué par le trait discontinu en bleu, le secteur urbanisé (SU) en blanc, le secteur à urbaniser (SAU) en jaune et la zone d'expansion touristique (ZET) en gris.

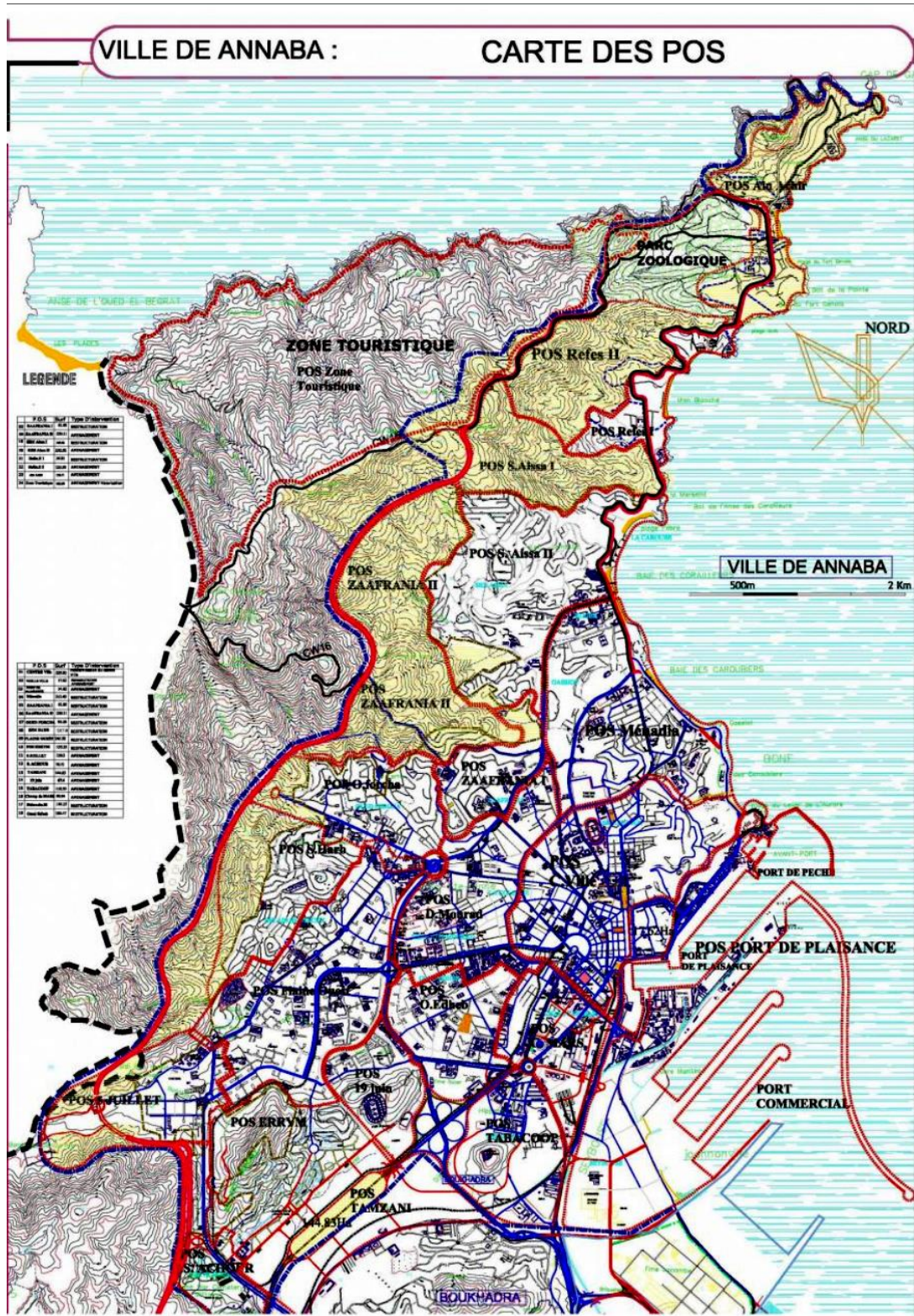


Figure 19. Carte des plans d'occupation des sols (POS) à date récente de la ville d'Annaba (Source : <http://archidata.org/>)

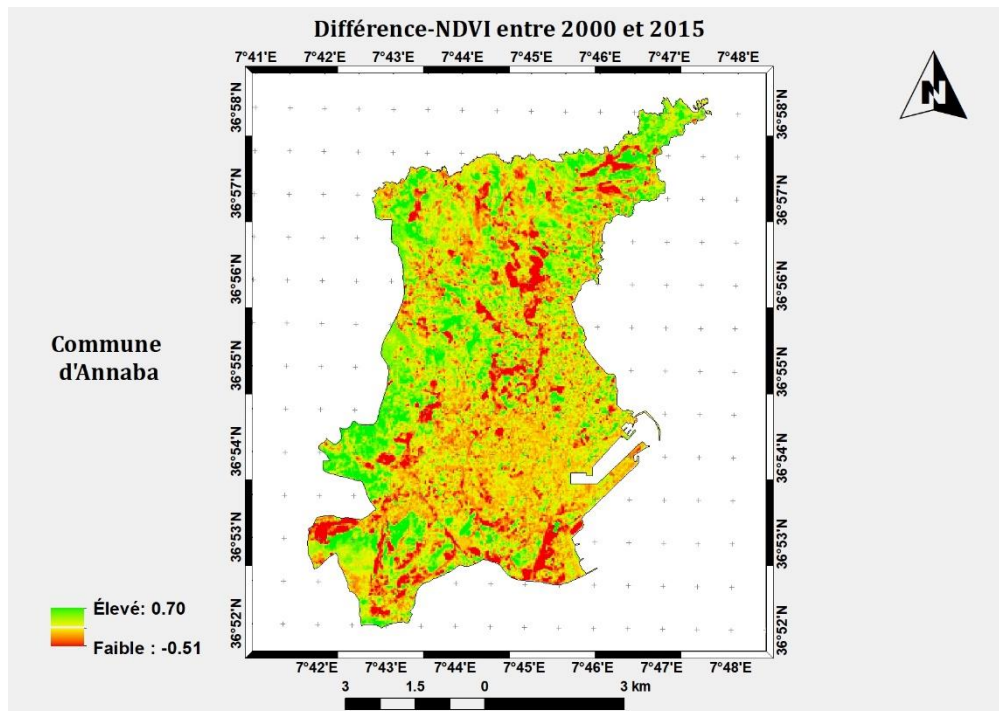


Figure 20. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »

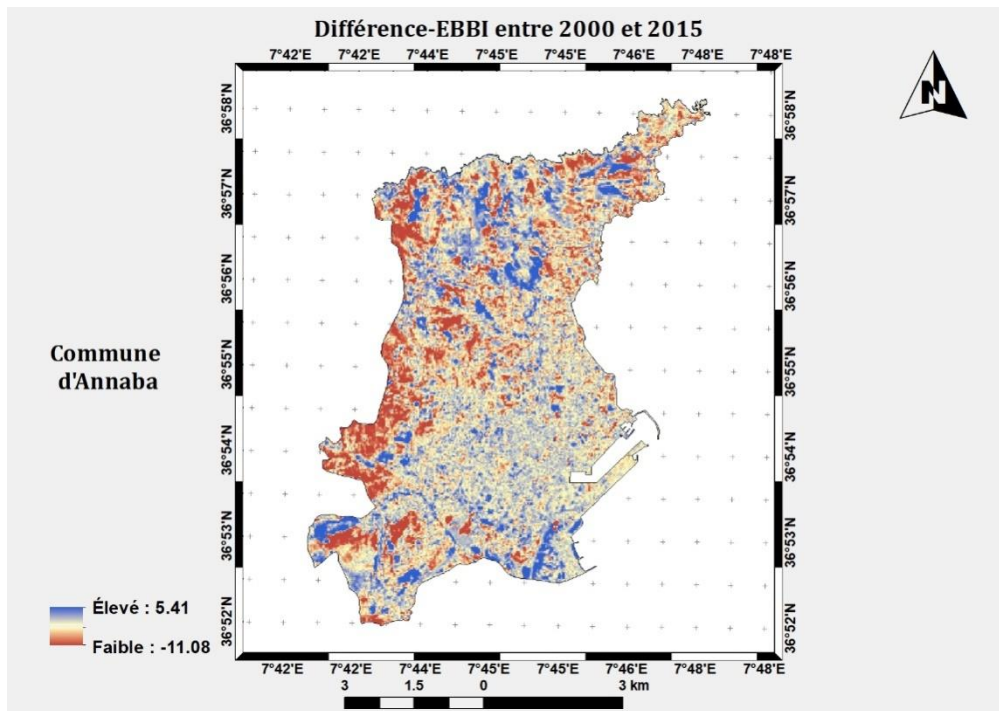


Figure 21. Différence-E-BBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »

Le changement qui nous intéresse est représenté par les formes en bleu dans l'image dEBBI (Fig. 21) indiquant l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus. Nous remarquons que ces formes sont montrées en rouge dans l'image dNDVI (Fig. 20) indiquant une diminution du couvert végétal. Ces dernières sont observées dans la région nord où sont localisés les sites d'Ain Achir, du parc zoologique et de la zone touristique (Fig. 19). Selon le POS, le site d'Ain Achir est inclus dans le secteur à urbaniser et à aménager tels que prescrits par le projet du PDAU, qui consiste en des procédures d'aménagement de la plage, des aménagements extérieurs (parking, terrasses et espaces de détente), réaménagement du parc zoologique (aires de détente et de distraction ainsi que des installations de loisirs), création d'une continuité d'équipements le long du littoral et aucun programme d'habitat pour ce site. Par ailleurs, le POS indique que la zone touristique est programmée pour une intervention d'aménagement et de valorisation de ce site naturel (massif de l'Edough) qui consiste en aménagement des parcours de promenade le long du littoral jusqu'à la plage Djenane El Bey dans la commune de Seraïdi avec des installations et des constructions qui doivent être réalisées avec des matériaux naturels (bois par ex.).

D'autre part, ces formes du changement sont perceptibles dans la région du sud-ouest située entre les latitudes 36°52'N, 36°53'N et les longitudes 7°42'E, 7°44'E. Dans laquelle se trouvent les sites du 5 juillet, d'Errym, et de Plaine Ouest. D'après le POS, le tissu urbain de ces secteurs est en projet d'aménagement, de restructuration et d'extension en intégrant les extensions sur les terrains urbanisables dont la densité prévue est de 25 logts/ha. D'autre part, le changement est observé également sur le site repéré à la latitude 36°56'N et la longitude 7°45'E, dans le secteur de Seybouse au sud-est (36°53'N et 7°45'E) et au sein de la ville même.

Suivant les traits du relief, La zone urbanisée de la commune d'Annaba s'étend sur la grande plaine entre la côte-est et le mont de l'Edough. Ce dernier constitue la barrière de la croissance urbaine de la ville d'Annaba. D'une façon générale, le changement est réparti aléatoirement et l'évolution des sols artificialisés et des sols nus se prolonge de l'est à l'ouest vers les zones naturelles.

La figure 22 montre une vue d'ensemble du port d'Annaba. Nous pouvons y constater la construction d'un quai (cercle en rouge) au niveau du port de pêche entre 2000 et 2015 (Figs. 22-A et 22-B). Ce changement a été détecté comme une augmentation des valeurs NDVI entre 2000 et 2015 (Fig. 22-C) mais nous savons bien que les valeurs élevées de la différence-NDVI peuvent aussi déceler une baisse du niveau de l'eau. Par ailleurs, la différence-EBBI élimine cette confusion car ce changement a été détecté comme une augmentation des valeurs EBBI entre les deux dates (Fig. 22-D). Ceci confirme pratiquement l'intérêt d'utiliser la différence-EBBI pour quantifier l'évolution des sols artificialisés et des sols nus.

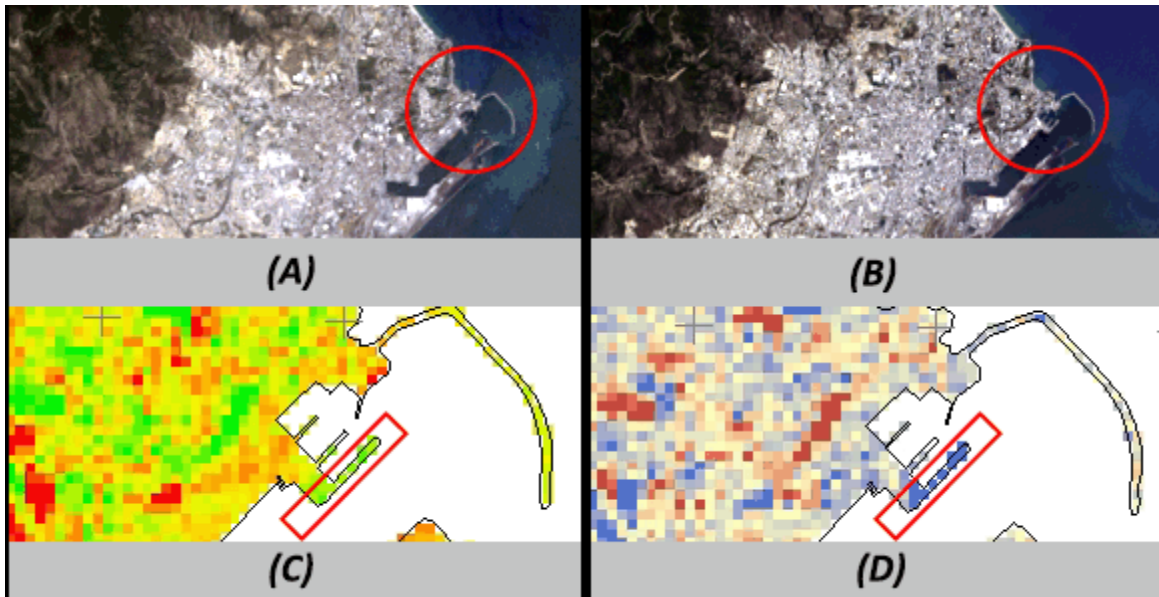


Figure 22. Port d'Annaba (a) Vue le 27 juin 2000 par Landsat 7 ETM+, (b) Vue le 29 juin 2015 par Landsat 8 OLI/TIRS, (c) Différence-NDVI entre 2000 et 2015, (d) Différence-EBBI entre 2000 et 2015

2.1.1.2. Analyse quantitative

L'augmentation des sols artificialisés et des sols nus entre 2000 et 2015 dans la commune d'Annaba est indiquée par la couleur bleu représentant la classe des valeurs élevées de la différence-EBBI (Fig. 23). Cette augmentation a été estimée au niveau de la commune et au niveau de ses bandes littorales (Tab. 16).

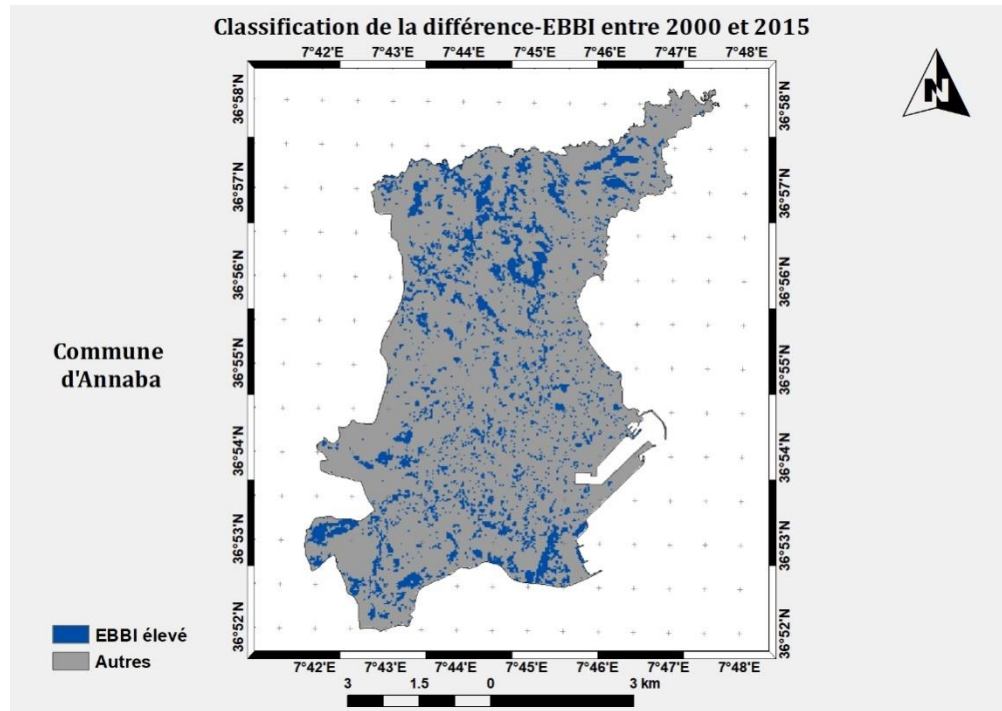


Figure 23. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »

Tableau 16. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »

Différents niveaux	Pourcentage	Superficie	
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	15.929	7.604	760.4
Au niveau de la bande littorale de 100 m	11.692	0.337	33.7
Au niveau de la bande littorale de 300 m	11.841	0.862	86.2
Au niveau de la bande littorale de 800 m	14.957	2.324	232.4
Au niveau de la bande littorale de 3 km	16.223	5.974	597.4

D'après les résultats indiqués dans le tableau 16, l'évolution des sols artificialisés et des sols nus a été estimée à 15.929% de la superficie de la commune d'Annaba soit 7.604 km² ou bien 760.4 ha. L'évolution répartie sur les quatre bandes littorales (100, 300, 800 m et 3 km) a été estimée respectivement à 33.7, 86.2, 232.4 et 597.4 hectares (Fig. 24). En outre, la bande littorale de 3 km qui représente environ 77.14% de la superficie de la commune d'Annaba, a été concernée par environ 78.56% du changement survenu.

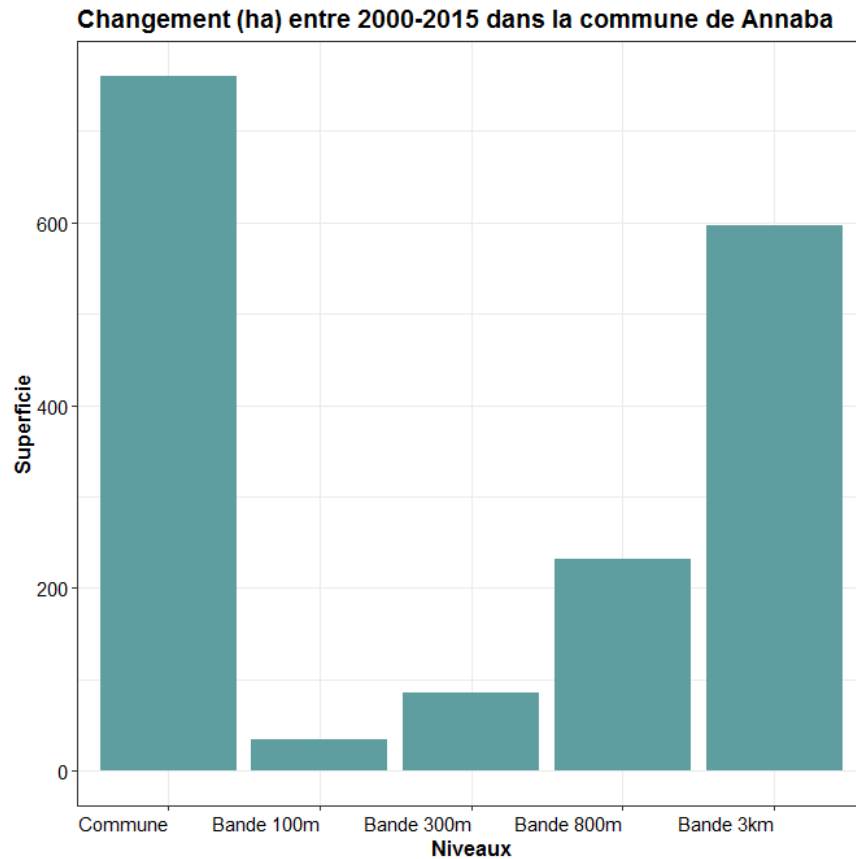


Figure 24. Résultats (en ha) de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Annaba »

2.1.2. Changement entre 2015 et 2019

2.1.2.1. Analyse qualitative

La figure 25 révèle que les formes du changement (en rouge) sont moins présentes que dans l'image précédente de la différence-NDVI entre 2000 et 2015 (Fig. 20). A priori, cela s'explique par la différence de l'intervalle de temps dans l'axe temporel de l'étude ; en 15 ans et en 4ans, l'évolution n'a pas la même ampleur. Les taches rouges sont, d'une façon générale, réparties aléatoirement, les plus remarquables se trouvent au nord (Ain Achir, parc zoologique et la zone touristique). Sur la zone touristique, nous pouvons voir une forme particulière qui consiste en une sorte de chemin qui s'étend vers l'ouest, ceci confirme ce que nous avons dit précédemment à propos des activités d'aménagement des parcours de promenade le long du littoral jusqu'à la plage Djenane El Beydans la commune de Seraïdi.

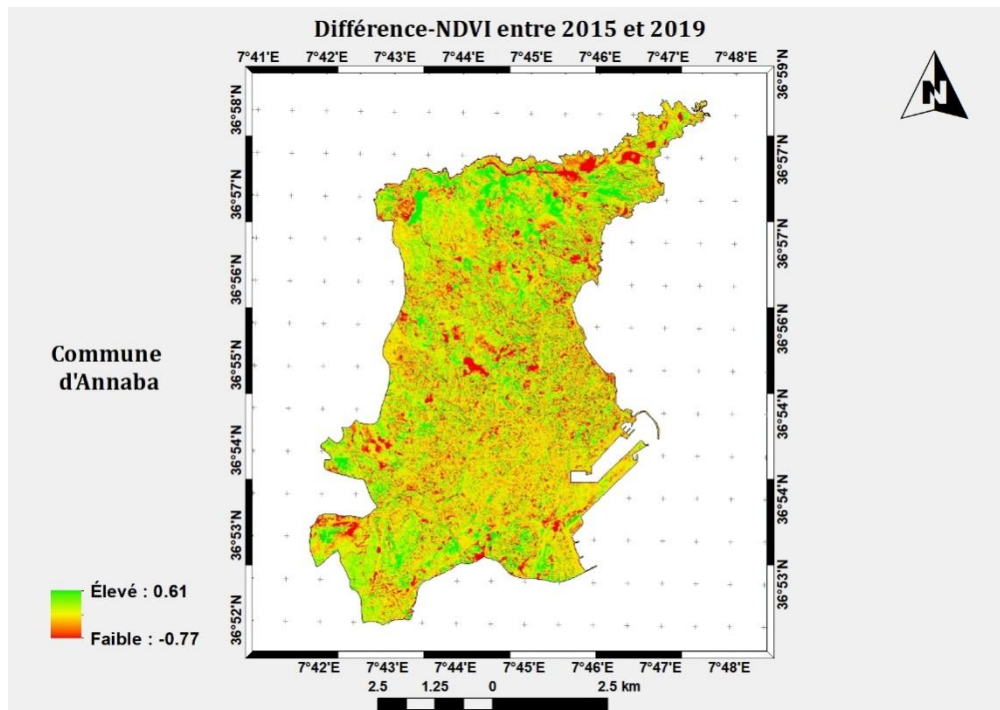


Figure 25. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'Annaba »

D'autre part, nous observons une augmentation des valeurs du NDVI entre les deux dates, indiquée en vert, particulièrement dans la partie nord. Par ailleurs, la couleur jaune indique les surfaces inchangées car les valeurs du NDVI pour les deux dates sont presque les mêmes. Ces surfaces sont largement répandues sur la scène, ce qui confirme que les changements observés précédemment (entre 2000 et 2015) sont très probablement des changements stables (sols artificialisés).

La figure 26 montre une vue d'ensemble de la commune d'Annaba. Les figures 26-A et 26-B représentent les images de la cohérence interférométrique en polarisation VV extraites des données Sentinel-1 IW SLC sur 12 jours d'intervalle ; respectivement entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 et entre le 04 et le 16 juin 2019. D'autre part, la figure 26-C représente la composition colorée « urbain fausses couleurs » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019.

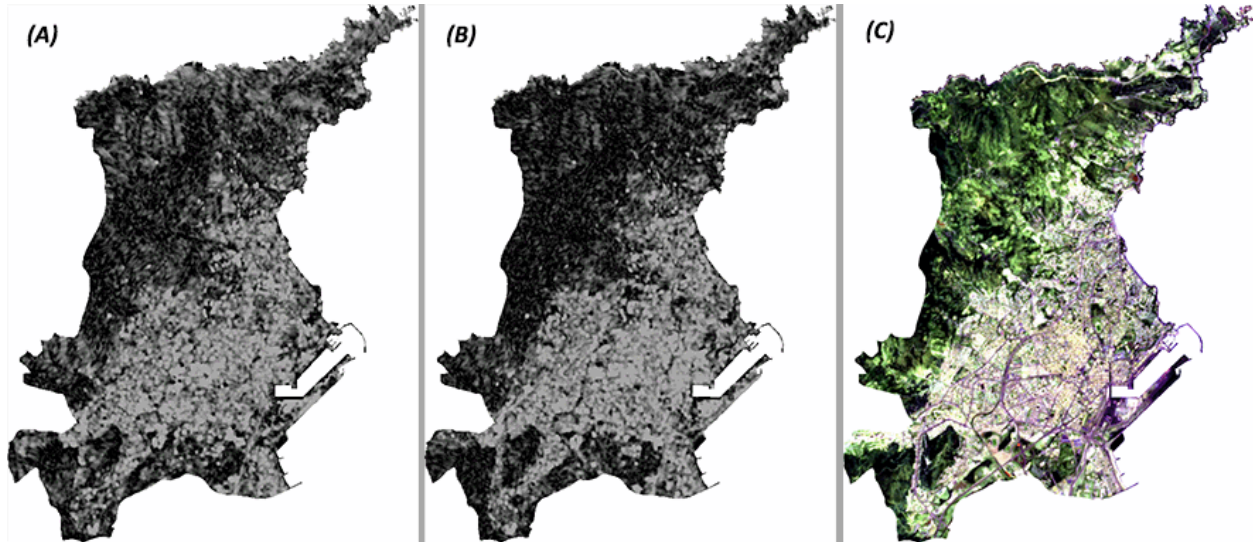


Figure 26. Vue d'ensemble de la commune d'Annaba, (A) et (B) Cohérence interférométrique en polarisation VV des données Sentinel-1 IW SLC, respectivement entre 01-13 juin 2015 et entre 04-16 juin 2019, (C) Composition colorée « urbain fausses couleurs » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019

Les zones urbaines sont indiquées en gris (valeurs de cohérence élevées) tandis que, les couverts végétaux sont montrés par la couleur noir (faibles valeurs de cohérence) (Fig. 26-A et 26-B). Nous avons souligné auparavant que les montagnes dénudées ont également des valeurs de cohérence élevées. En effet, nous observons dans la partie nord sur les deux images de cohérence, que certaines zones sont indiquées par des pixels gris en 2015 alors qu'en 2019, ces mêmes zones sont indiquées par des pixels noirs, à partir de l'observation de la différence-NDVI entre 2015 et 2019 (Fig. 25), ces zones particulières apparaissent en vert, cela explique que ce changement des valeurs de cohérence est très probablement dû à l'augmentation du couvert végétal dans ces régions montagneuses (massif de l'Edough). D'autre part, la zone urbaine d'Annaba est indiquée en violet et en blanc sur l'image de la composition colorée (Fig. 26-C). À partir de l'observation de l'image de cohérence de 2019 et de l'image de la composition colorée, nous pouvons voir que les pixels en gris correspondent presque toutes à la zone urbaine d'Annaba. Par conséquent, la couche de cohérence dans ce cas a été considérée comme la cartographie de la zone urbaine (sol urbain) de la commune d'Annaba.

2.1.2.2. Analyse quantitative

Les figures 27 et 28 représentent les cartes de la classification d'images de cohérence de la commune d'Annaba, dans lesquelles, le bleu montre la classe des valeurs élevées (zones urbaines et sols nus à des altitudes élevées) et le gris affiche la classe de faibles valeurs (autres caractéristiques de surface).

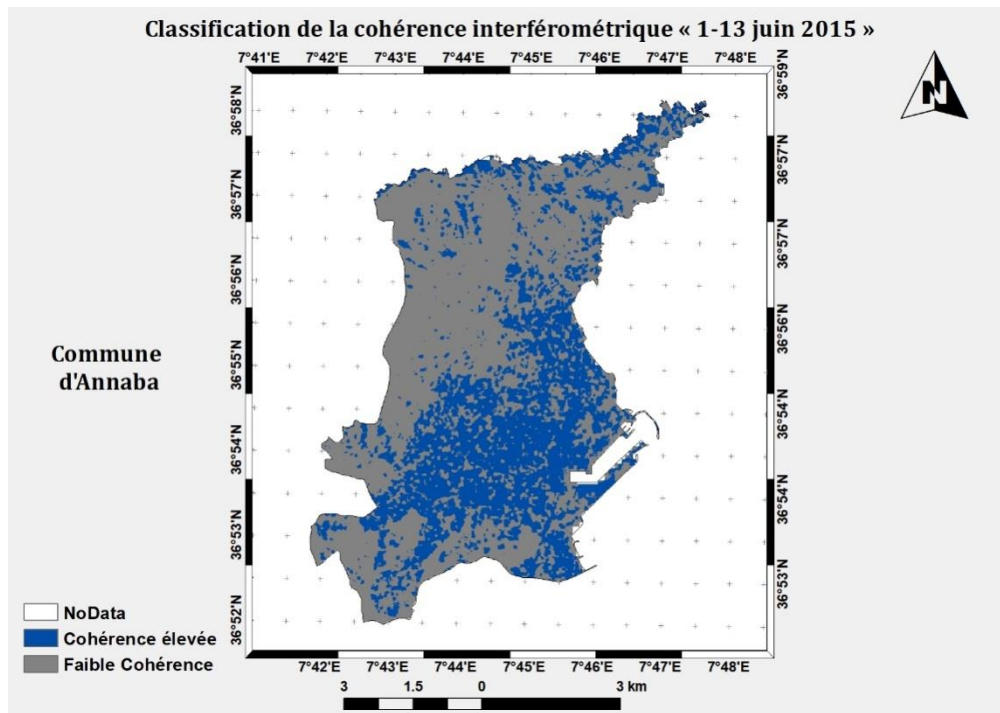


Figure 27. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'Annaba »

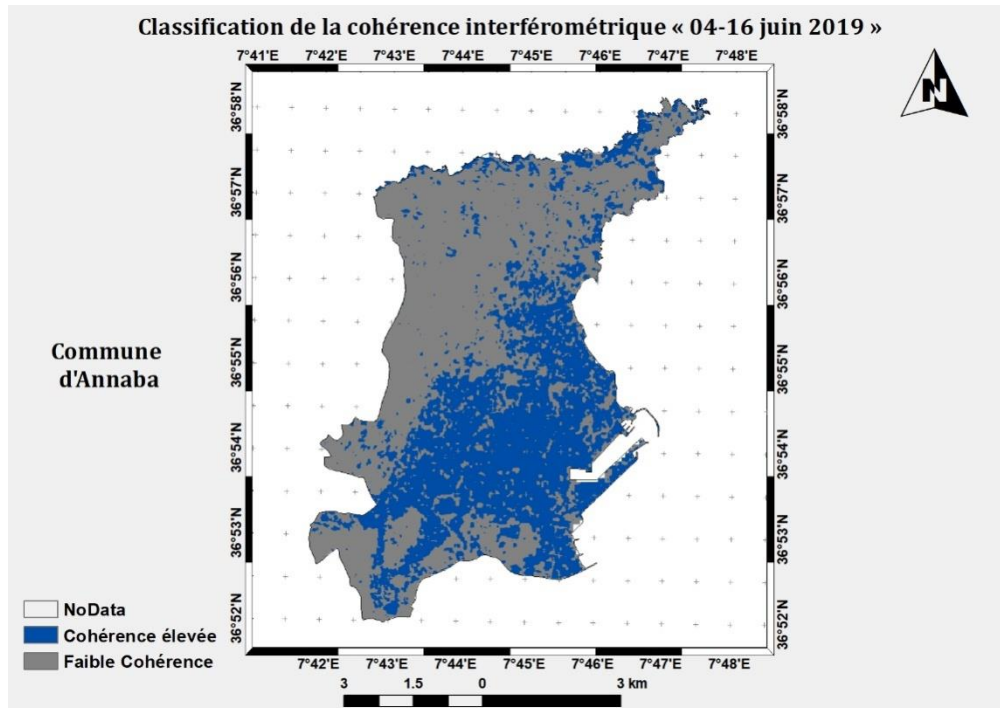


Figure 28. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Annaba »

Les résultats de la classification pour les des deux dates sont représentés dans les tableaux 17 et 18 tandis que, la comparaison de ces derniers est indiquée dans le tableau 19.

Tableau 17. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'Annaba »

Différents niveaux	Pourcentage	Superficie	
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	38.129	18.202	1820.2
Au niveau de la bande littorale de 100 m	50.877	1.470	147
Au niveau de la bande littorale de 300 m	47.692	3.471	347.1
Au niveau de la bande littorale de 800 m	42.647	6.627	662.7
Au niveau de la bande littorale de 3 km	41.835	15.407	1540.7

Tableau 18. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Annaba »

Différents niveaux	Pourcentage	Superficie	
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	41.677	19.896	1989.6
Au niveau de la bande littorale de 100 m	56.000	1.618	161.8
Au niveau de la bande littorale de 300 m	52.756	3.840	384
Au niveau de la bande littorale de 800 m	46.667	7.252	725.2
Au niveau de la bande littorale de 3 km	45.186	16.642	1664.2

D'après les résultats indiquées dans le tableau 18, la superficie de la zone urbaine en 2019 a été estimée à 19.896% de la superficie de la commune d'Annaba soit 1989.6 ha, à 56% de la superficie de la bande littorale de 100 m soit 161.8 ha, à 52.756% de la superficie de la bande littorale de 300 m soit 384 ha, à 46.667% de la superficie de la bande de 800 m soit 725.2 ha et à 45.186% de la superficie de la bande de 3 km soit 1664.2 ha.

Tableau 19. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Annaba »

Différents niveaux	Pourcentage	Superficie	
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	+3.548	+1.694	+169.4
Au niveau de la bande littorale de 100 m	+5.123	+0.148	+14.8
Au niveau de la bande littorale de 300 m	+5.064	+0.369	+36.9
Au niveau de la bande littorale de 800 m	+4.020	+0.625	+62.5
Au niveau de la bande littorale de 3 km	+3.351	+1.235	+123.5

Les résultats de la comparaison des classifications dans ce cas ont révélé une augmentation des sols essentiellement urbains entre 2015 et 2019. Cette augmentation est de 169 ha au niveau de la commune d'Annaba, de 14.8 ha dans la bande de 100 m, de 36.9 ha dans la bande de 300 m, de 62.5 ha dans la bande de 800 m et de 123.5 ha dans la bande de 3 km (Fig. 29). Comme c'est le cas entre 2000 et 2015, cette augmentation a été également concentrée sur les bandes littorales où la bande de 3 km englobe 72.9% du changement survenu.

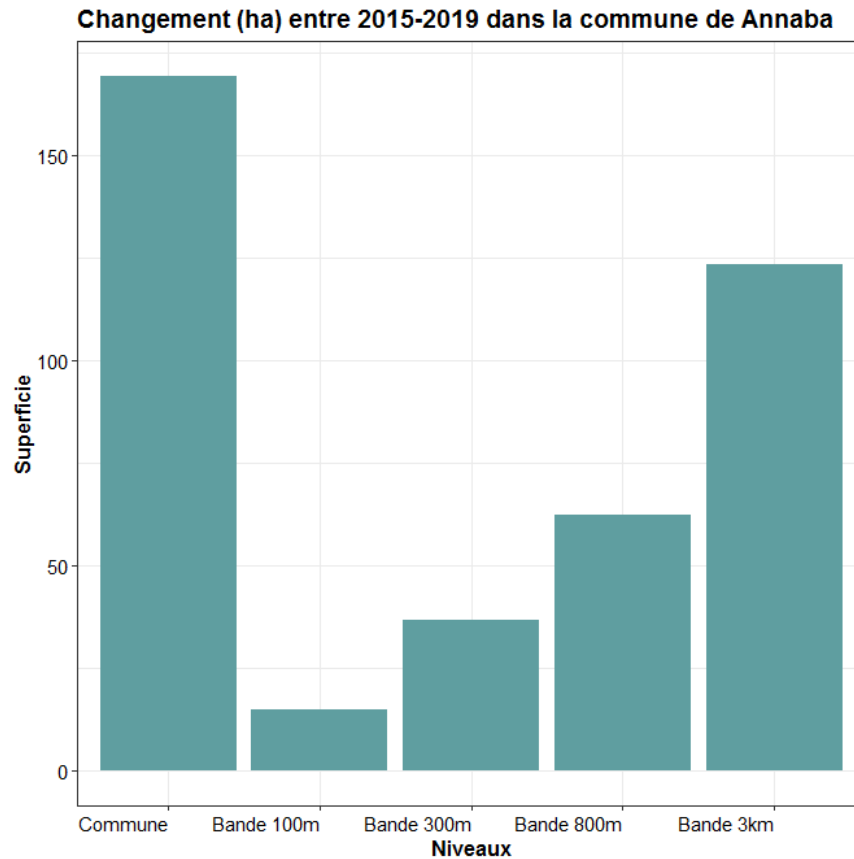


Figure 29. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Annaba »

2.2. Commune d'El Bouni

N'ayant pas pu nous procurer le POS de la commune d'El Bouni qui aurait très bien pu orienter notre interprétation et valider nos résultats, nous avons eu recours à la confrontation de nos résultats tels que « dNDVI-dEBBI-Composition colorée » ou « Cohérence-dNDVI-Composition colorée ».

2.2.1. Changement entre 2000 et 2015

2.2.1.1. Analyse qualitative

La figure 30 montre la composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune d'El Bouni en 2000 (Fig. 30-A) et en 2015 (Fig. 30-B). Les zones urbaines sont visualisées en violet et en blanc, ces dernières sont repérées par le symbole ponctuel (+) en rouge représentant les agglomérations et les localités de la commune ; El Bouni Centre(a), Bou Khadra(b), Gharbi Aïssa(c), Chabbia(d), Cité 1er Mai 56(e), Essarouel(f), Oued Ennil (g), Sidi Salem (h) et Chouali Belkacem(i). Les terrains agricoles se trouvent à l'est et à l'ouest de l'Oued Seybouse qui est indiqué par le trait gras en bleu (les plaines de Seybouse) et aussi au niveau de la région d'Essarouel qui est délimitée par le polygone jaune. Les limites des aires naturelles (forêts et maquis d'El Bouni) sont indiquées par les traits en noir.

L'élévation du terrain varie de 4 à 720 mètres où les terres plates (entre 4 et 83 mètres) sont prédominantes, ces derniers sont représentés essentiellement par les plaines de Seybouse et de la région d'Essarouel. Dans les zones naturelles, au nord-ouest, l'élévation augmente progressivement jusqu'à 720 mètres alors que dans la partie sud-ouest, elle va jusqu'à 242 mètres (voir annexe12).

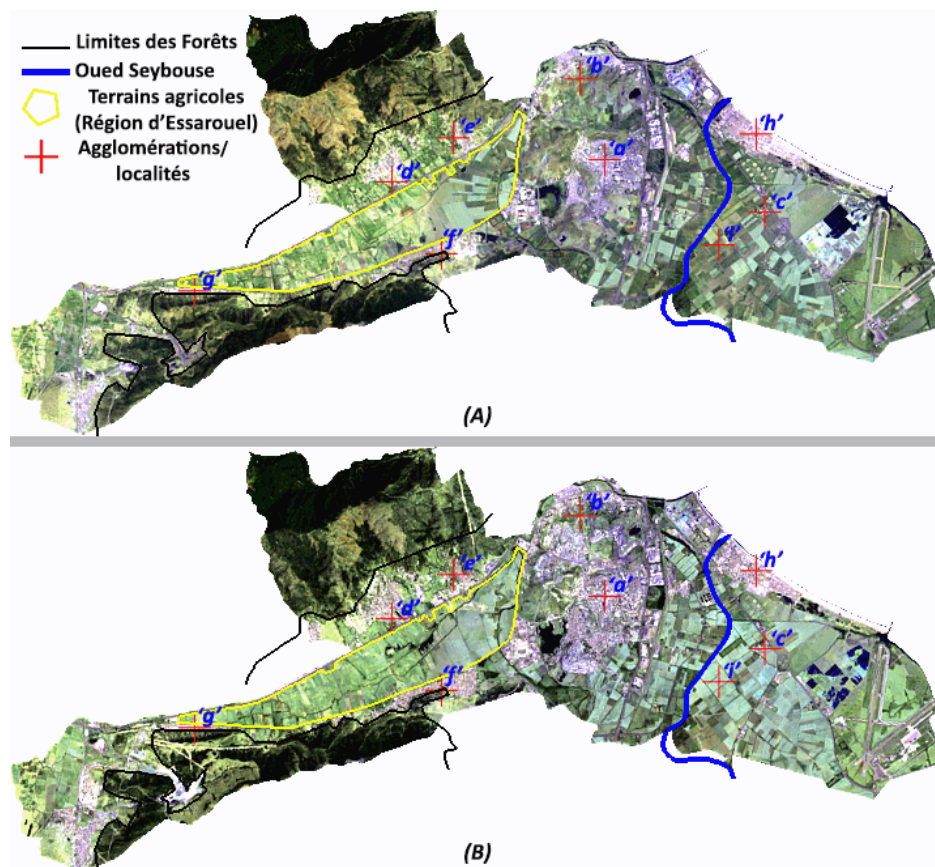


Figure 30. Commune d'El Bouni, Composition colorée « urbain fausses couleurs » (A) Image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015, (B) Image Landsat 7 ETM+ du 27 juin 2000

Le changement survenu entre 2000 et 2015 dans la commune d'El Bouni est indiqué dans les cartes des différences ci-dessous (Figs. 31 et 32).

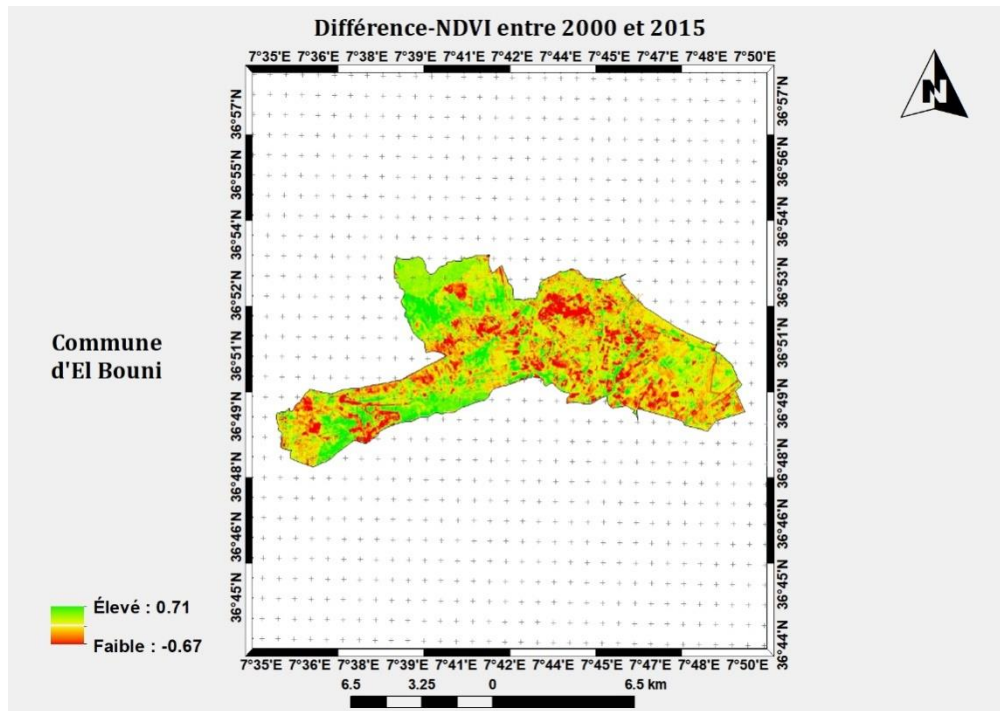


Figure 31. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »

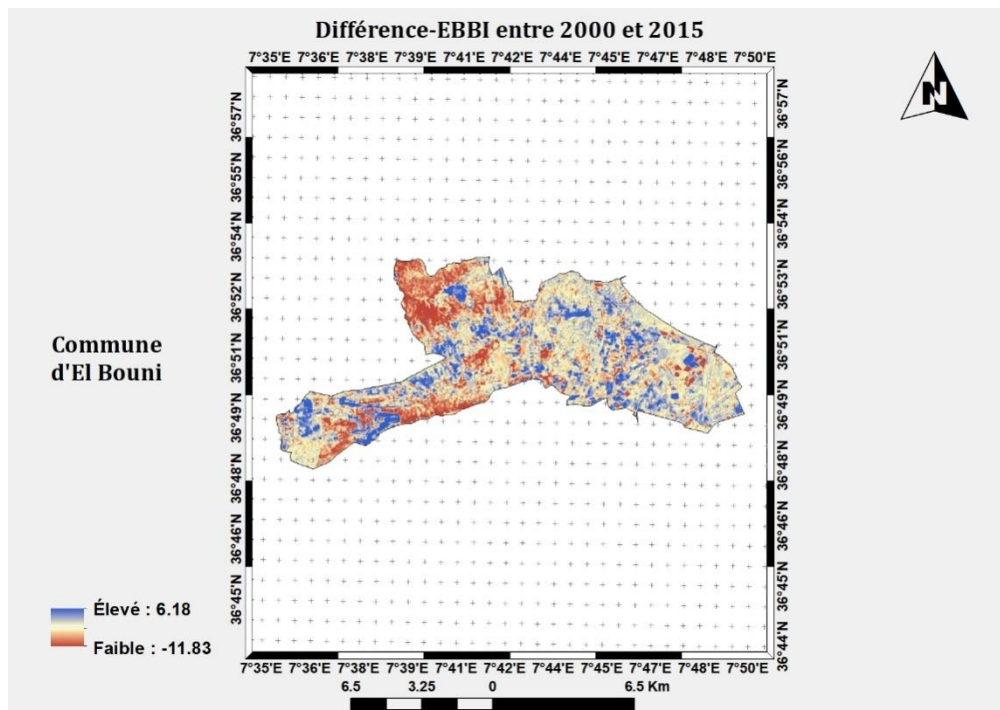


Figure 32. Différence-E-BBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »

D'une façon générale, les formes du changement sont réparties aléatoirement mais les plus perceptibles sont situées autour de l'agglomération d'El Bouni (36°51' N, 7°44' E), de Chabbia (36°50' N, 7°41' E) et de Cité 1^{er} Mai (36°51' N, 7°42' E). Il est à souligner que, le changement autour ces agglomérations est plus susceptible d'être dû à l'expansion de leurs zones urbaines. D'autre part, ces formes sont observées dans les régions du sud-ouest, dans la zone naturelle du nord-ouest sur le site repéré à la latitude 36°53' N et la longitude 7°41' E et aussi dans les zones agricoles, au niveau de ces dernières il existe une confusion ; si une parcelle agricole a été récoltée à la date 2 (2015), ce changement sera détecté comme une augmentation des sols nus.

2.2.1.2. Analyse quantitative

L'augmentation des sols artificialisés et des sols nus entre 2000 et 2015 dans la commune d'El Bouni est indiquée par les zones en bleu (Fig. 33), ces dernières représentent la classe des valeurs élevées de la différence- EBBI. Cette augmentation a été calculée au niveau de la commune et au niveau de ses bandes littorales (Tab. 20).

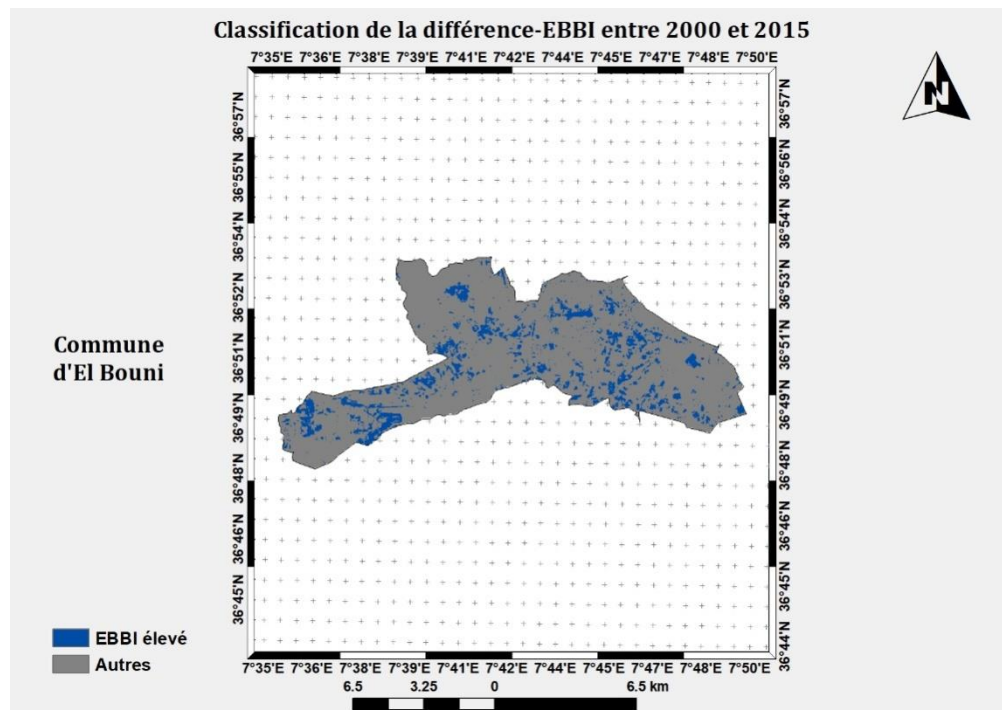


Figure 33. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »

Tableau 20. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »

Différents niveaux	Pourcentage	Superficie	
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	13.703	12.778	1277.8
Au niveau de la bande littorale de 100 m	3.086	0.018	1.8
Au niveau de la bande littorale de 300 m	4.928	0.087	8.7
Au niveau de la bande littorale de 800 m	7.609	0.383	38.3
Au niveau de la bande littorale de 3 km	12.784	3.366	336.6

D'après les résultats indiquées dans le tableau 20, l'évolution des sols artificialisés et des sols nus a été estimée à 13.703% de la superficie de la commune d'El Bouni soit 12.778 km² ou bien 1277.8 ha. D'autre part, l'évolution dans les bandes littorales a été estimée respectivement à 1.8, 8.7, 38.3 et 336.6 hectares (Fig. 34). La bande littorale de 3 km représente environ 28.23% de la superficie de la commune d'El Bouni, cette dernière englobe environ 26.34% du changement survenu entre les deux dates.

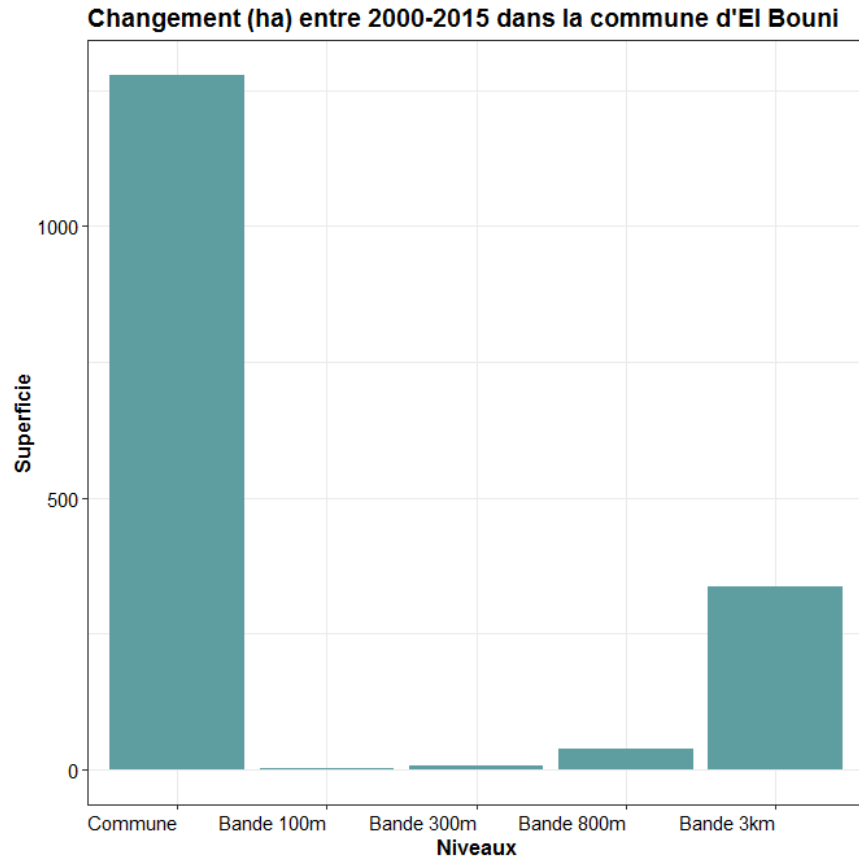


Figure 34. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'El Bouni »

2.2.2. Changement entre 2015 et 2019

2.2.2.1. Analyse qualitative

D'après la figure 35, le changement qui nous intéresse n'était pas considérable entre ces deux dates (période de 4 ans). Bien que nous constatons une diminution remarquable du couvert végétal (indiquée en rouge) sur le site naturel repéré à la latitude $36^{\circ}52' N$ et la longitude $7^{\circ}41' E$. Par ailleurs, les formes en vert indiquant une augmentation du couvert végétal sont observées sur les sites naturels identifiés par les coordonnées $36^{\circ}52' N, 7^{\circ}41' E$ et par les coordonnées $36^{\circ}49' N, 7^{\circ}38' E$ et aussi au niveau des terrains agricoles en raison des activités de culture et de récolte. La couleur jaune montre les surfaces inchangées car les valeurs NDVI pour les deux dates sont presque les mêmes. Ces surfaces sont prédominantes dans la scène, ce qui confirme que les formes du changement observées précédemment (entre 2000 et 2015) surtout autour les zones urbaines, sont plus susceptibles d'être des changements stables (sols artificialisés).

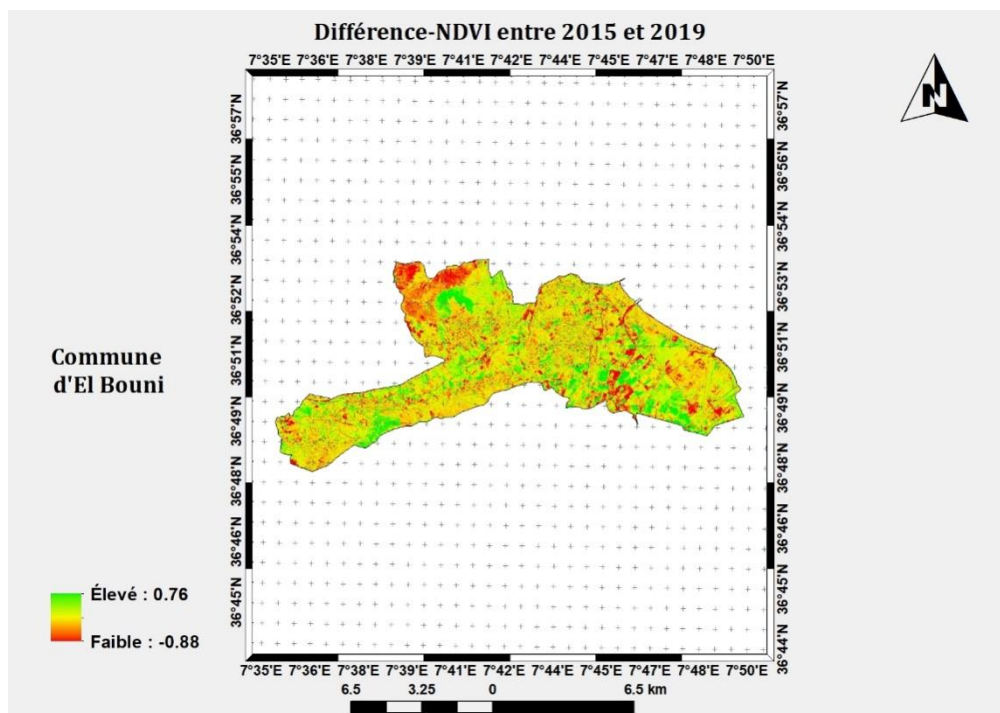


Figure 35. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'El Bouni »

La figure 36 présente une vue d'ensemble de l'embouchure de l'Oued Seybouse sur laquelle nous pouvons constater la construction des endiguements pour canaliser l'embouchure vu sa mobilité naturelle (encadrée en rouge) entre 2015 et 2019 (Figs. 36-A et 36-B). Ce changement a été détecté comme une augmentation des valeurs du NDVI entre les deux dates (Fig. 36-C). Ceci montre bien que les valeurs élevées de la différence-NDVI indique également une baisse du niveau de l'eau.

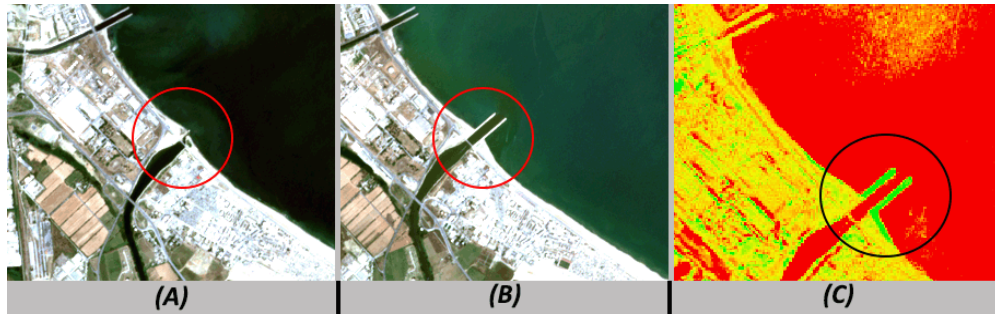


Figure 36. Embouchure de l'Oued Seybouse, El Bouni (A) Image Sentinel-2A MSI du 04 juillet 2015, (B) Image Sentinel-2A MSI du 23 juillet 2019, (C) Différence-NDVI entre 2015-2019

La figure 37 montre la commune d'El Bouni par deux vues, celle d'en haut représente la composition colorée « fausses couleurs urbain » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019 et celle d'en bas représente l'image de la cohérence interférométrique en polarisation VV extraite des données Sentinel-1 IW SLC sur 12 jours d'intervalle (entre le 04 et le 16 juin 2019).

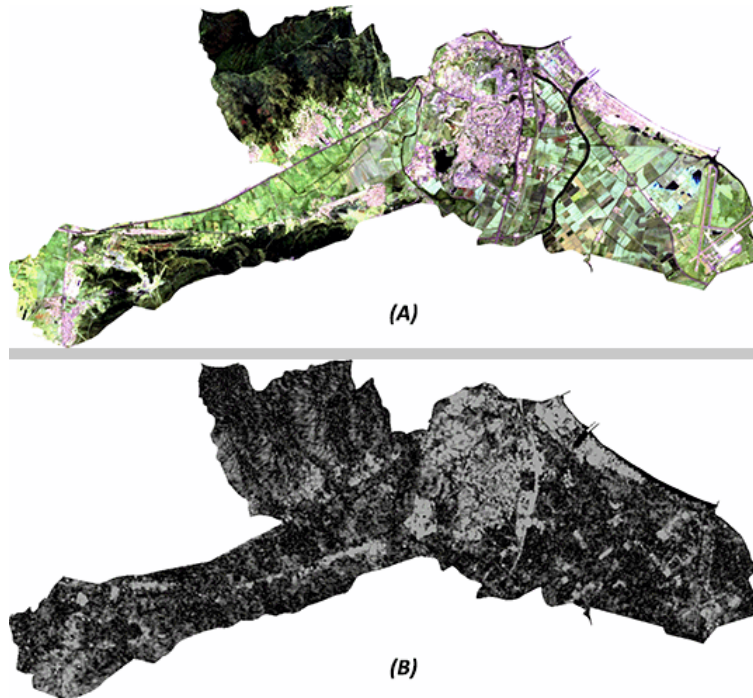


Figure 37. Commune d'El Bouni, (A) Composition colorée « fausses couleurs urbain » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV

La composition colorée « fausses couleurs urbain » montre les zones urbaines particulièrement en violet et en blanc (Fig. 37-A). D'autre part, ces dernières sont indiquées par les pixels à valeurs de cohérence élevées (en gris) tandis que, les couverts végétaux, les bassins hydrographiques (Oued Seybouse) et les terrains agricoles sont particulièrement indiqués par les pixels à faibles valeurs de cohérence (en noir) (Fig. 37-B). Dans ce cas aussi, par l'observation des deux images, nous pouvons constater que les sols à valeurs de cohérence élevées sont presque des sols urbains, bien qu'il y ait des sols nus à des altitudes élevées dans les régions naturelles du nord-ouest (163 à 561 m) et du sud-ouest (242 m) qu'ils sont indiqués par des valeurs élevées de cohérence.

2.2.2.2. Analyse quantitative

Les figures 38 et 39 représentent les cartes de la classification d'images de cohérence de la commune d'El Bouni, dans lesquelles la classe des valeurs élevées est indiquée en bleu (zones urbaines et sols nus à des altitudes élevées) et la classe de faibles valeurs est montrée en gris (autres caractéristiques de surface).

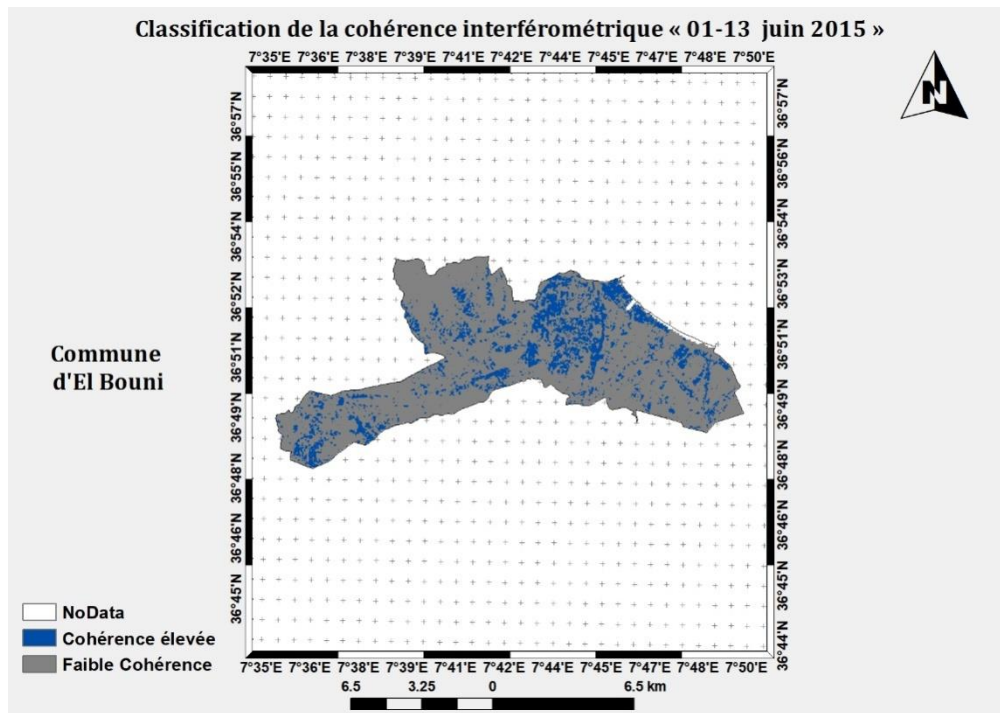


Figure 38. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1er et le 13 juin 2015 « Commune d'El Bouni »

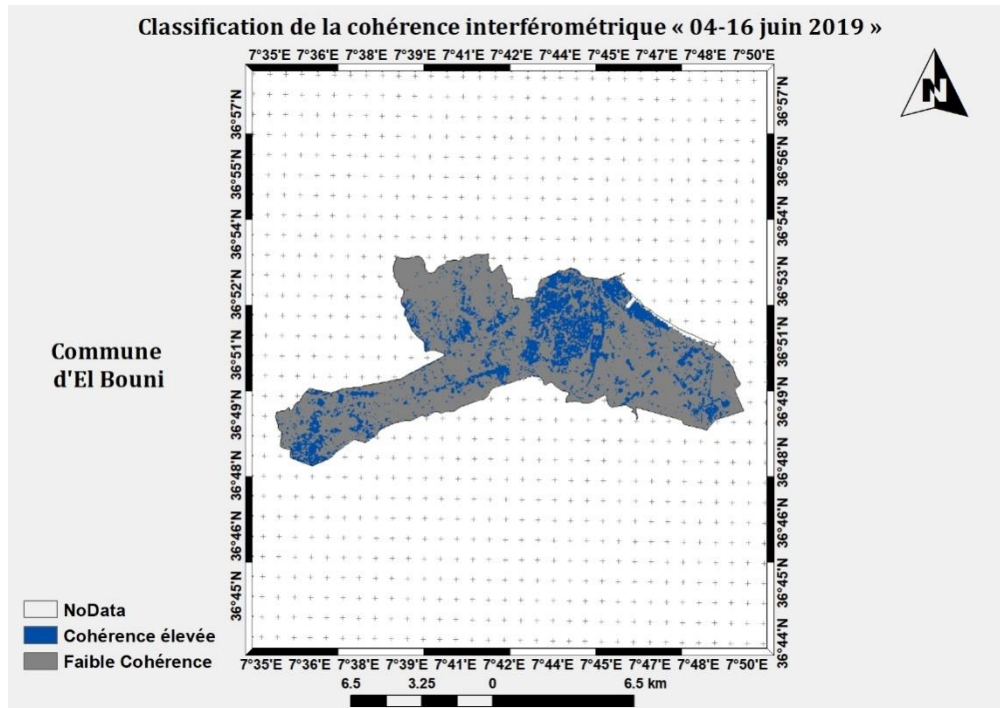


Figure 39. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'El Bouni »

Les tableaux 21 et 22 représentent les résultats de la classification pour les deux dates tandis que, le tableau 23 désigne la comparaison de ces résultats :

Tableau 21. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune d'El Bouni »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	20.136	18.776	1877.6	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	41.667	0.737	73.7	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	37.179	1.873	187.3	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	27.679	7.287	728.7	

Tableau 22. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'El Bouni »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	22.829	21.288	2128.8	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	33.333	0.199	19.1	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	47.619	0.842	84.2	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	42.857	2.159	215.9	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	29.888	7.869	786.9	

D'après les résultats indiqués dans le tableau 22, la superficie des zones urbaines en 2019a été estimée à 22.829% de la superficie de la commune d'El Bouni soit 2128.8 ha, à 33.3 % de la superficie de la bande littorale de 100 m soit 19.1 ha, à 47.616 % de la superficie de la bande littorale de 300 m soit 84.2 ha, à 42.857% de la superficie de la bande de 800 m soit 215.9 ha et à 29.8% de la superficie de la bande de 3 km soit 786.9 ha.

Tableau 23. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'El Bouni »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	+2.693	+2.512	+251.2	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	+33.333	+0.199	+19.9	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	+5.952	+0.105	+10.5	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	+5.678	+0.286	+28.6	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	+2.209	+0.582	+58.2	

Les résultats de la comparaison des classifications dans ce cas ont révélé une augmentation des sols essentiellement urbains entre 2015 et 2019. Cette augmentation a été estimée à 251.2 ha au niveau de la commune d'El Bouni, à 19.9 ha au niveau de la bande de 100 m, à 10.5 ha au niveau de la bande de 300 m, à 28.6 ha au niveau de la bande de 800 m et à 58.2 ha dans la bande de 3 km (Fig. 40), cette dernière englobe environ 23.16% du changement survenu entre les deux dates. En outre, un changement considérable a eu lieu dans la bandelittorale de 100 m.

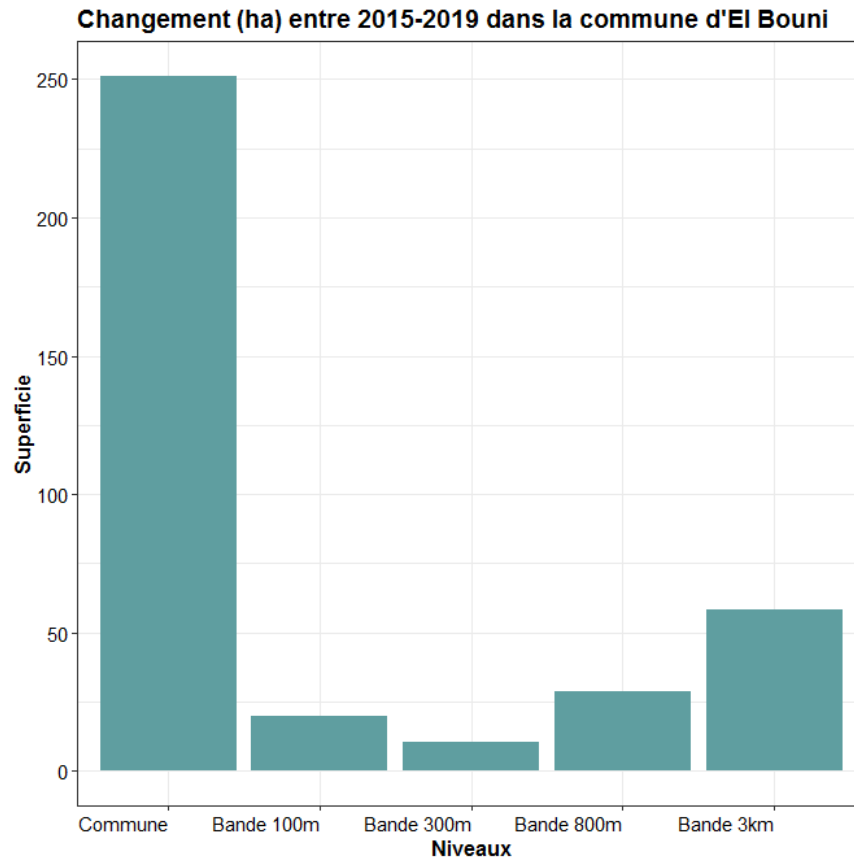


Figure 40. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique entre 2015 et 2019 « Commune d'El Bouni »

2.3. Commune d'Oued El Aneb

N'ayant pas pu nous procurer le POS de la commune d'Oued El Aneb qui aurait très bien pu orienter notre interprétation et valider nos résultats, nous avons eu recours à la confrontation des résultats tels que « dNDVI-dEBBI-Composition colorée » ou « Cohérence-dNDVI-Composition colorée ».

2.3.1. Changement entre 2000 et 2015

2.3.1.1. Analyse qualitative

La figure 41 montre la composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune d'Oued El Aneb (partie sud) en 2000 (Fig. 41-A) et en 2015 (Fig. 41-B). Le trait en blanc indique la limite de l'aire naturelle (massif de l'Edough) qui est située au nord de celle-ci, tandis qu'au sud se localisent les zones urbaines qu'elles sont affichées en violet. Ces dernières sont repérées par le symbole de localisation (+) en noir représentant les agglomérations et les localités d'Oued El Aneb (semi-rurale), de Draa Erich (semi-rurale), d'Oued Zied (localité) et de Kherraza (sub-urbaine) respectivement de gauche à droite. Le polygone en rouge indique le périmètre de la nouvelle ville de Draa Erich (numérisé via Google Earth Pro). En outre, les terrains agricoles sont distribués autour les agglomérations d'Oued El Aneb et de Draa Erich (observation via Google Earth Pro). Il convient de souligner, qu'au niveau des bandes littorales il n'y a aucun signe d'établissement humain.

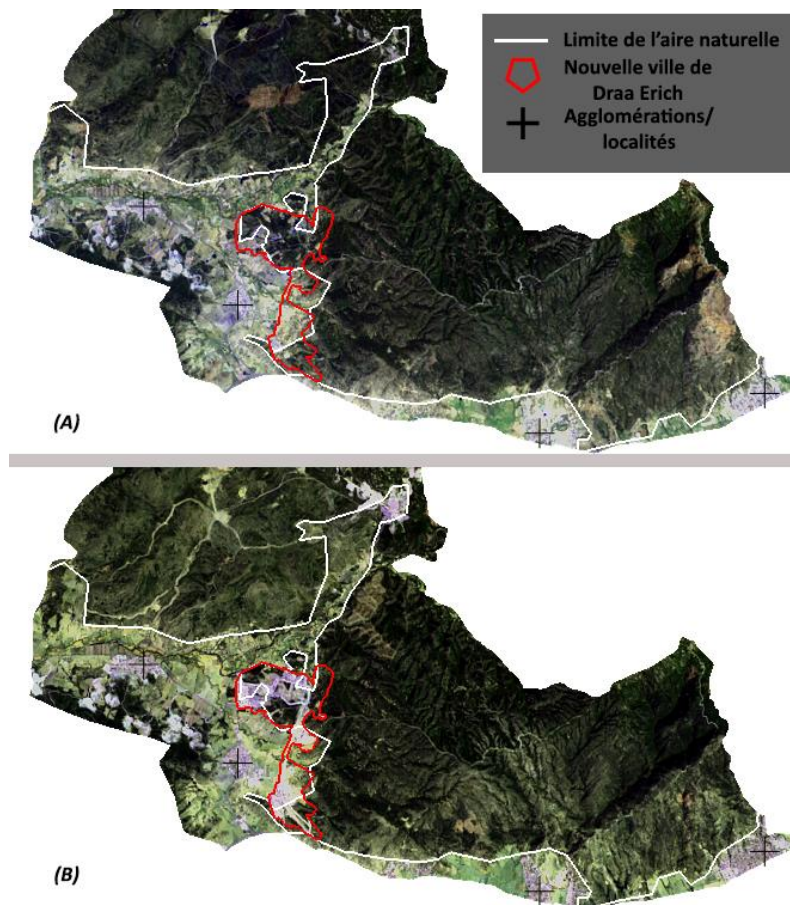


Figure 41. Partie sud de la commune d'Oued El Aneb, Composition colorée « urbain fausses couleurs »
 (A) Image Landsat 7 ETM+ du 27 juin 2000, (B) Image Landsat 8 OLI/TIRS du le 29 Juin 2015

Le changement survenu entre 2000 et 2015 dans la commune d'Oued El Aneb est indiqué dans les cartes des différences ci-dessous (Figs. 42 et 43).

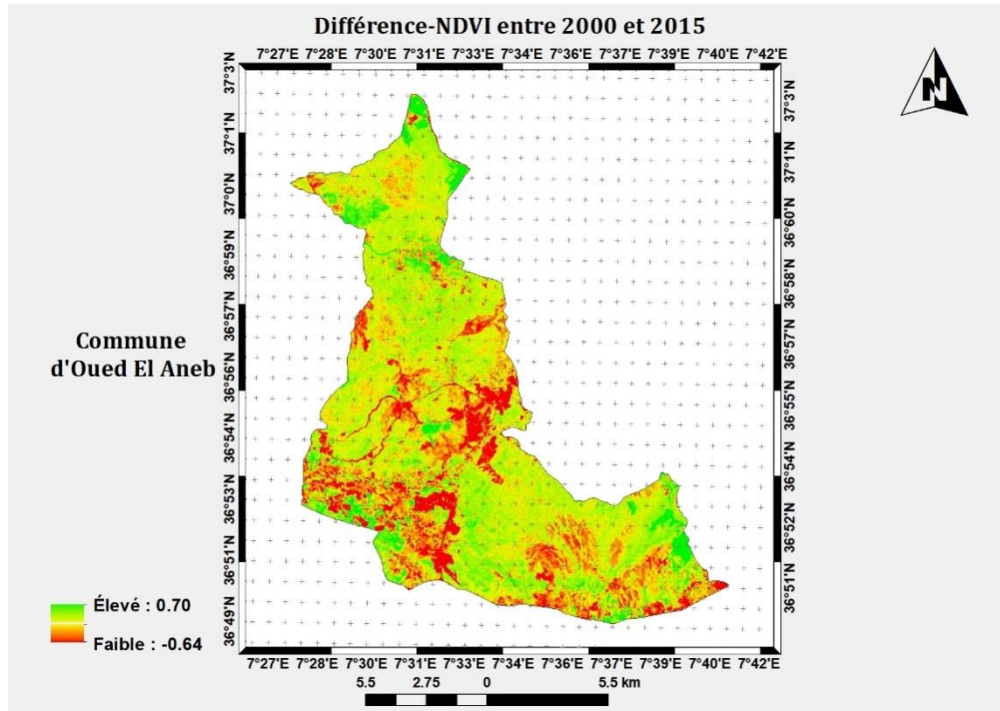


Figure 42. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

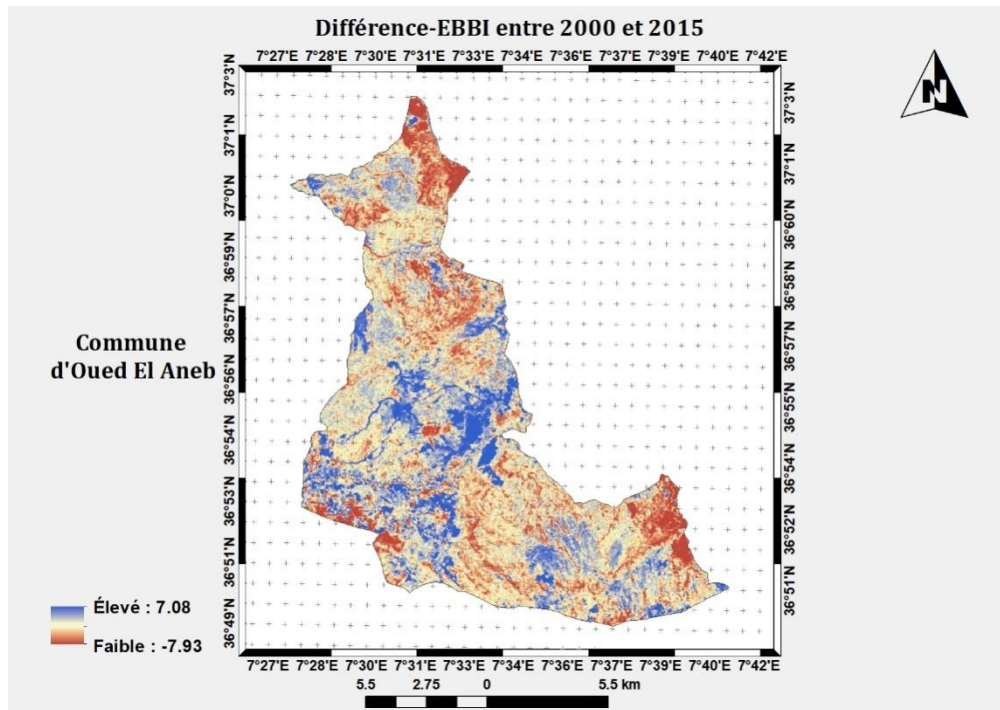


Figure 43. Différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

D'une façon générale, le changement est observé aussi bien au niveau de la partie sud de la commune où se situent ses zones urbaines qu'au niveau de l'aire naturelle. Dans la partie sud, le changement est observé sur le site repéré à 36°55' N, 7°33' E, au niveau des agglomérations semi-rurales d'Oued El Aneb, de Draa Erich par la présence des formes clairsemées et au niveau du site qui est localisé à la latitude 36°52' N et la longitude 7°31' E ; ce site a connu l'implantation du projet de la nouvelle ville Draa Errich qui relève du plan quinquennal 2010-2014. Selon Mellouk et Aroua 2015, ce pôle urbain occupe une superficie de 1344 ha et prévoit une artificialisation quasi totale du site et du déboisement de plus de 1340 ha du domaine forestier et agricole. Au niveau de l'aire naturelle, nous observons une sorte de chemins qui se terminent sur le site localisé à la latitude 36°55'N et la longitude 7°31'E. En outre, aucun changement remarquable n'est constaté sur les bandes littorales.

2.3.1.2. Analyse quantitative

L'augmentation des sols artificialisés et des sols nus entre 2000 et 2015 dans la commune d'Oued El Aneb est indiquée par les zones en bleu (Fig. 44). Cette augmentation a été calculée au niveau de la commune et au niveau de ses bandes littorales (Tab. 24).

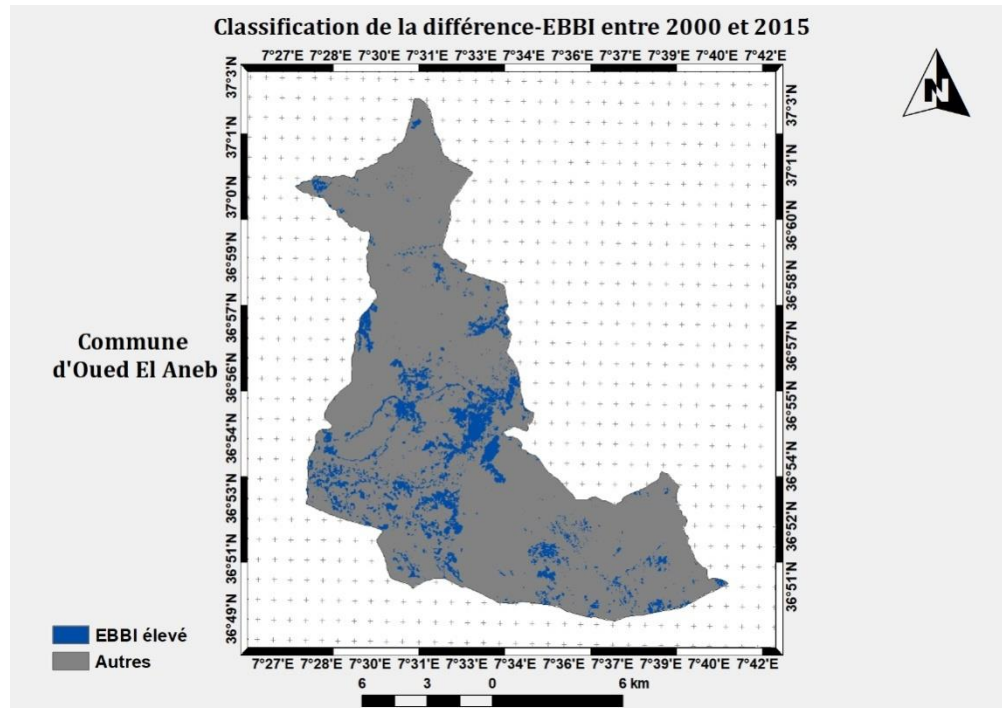


Figure 44. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

Tableau 24. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	11.091	21.008	2100.8
Au niveau de la bande littorale de 100 m	6.667	0.032	3.2
Au niveau de la bande littorale de 300 m	2.083	0.029	2.9
Au niveau de la bande littorale de 800 m	2.767	0.101	10.1
Au niveau de la bande littorale de 3 km	1.554	0.202	20.2

D'après les résultats indiqués dans le tableau 24, l'évolution des sols artificialisés et des sols nus a été estimée à 11.091% de la superficie de la commune d'Oued El Aneb soit 21.008 km² ou bien 2100.8 ha. D'autre part, l'évolution dans les bandes littorales a été estimée respectivement à 3.2, 2.9, 10.1 et 20.2 hectares (Fig. 45). La bande littorale de 3 km ne représente qu'environ 6.86% de la superficie de la commune d'Oued El Aneb. Cette dernière englobe environ 0.96% du changement survenu entre les deux dates. Ce faible pourcentage est dû à l'inexistence des établissements humains au niveau de ces espaces naturels.

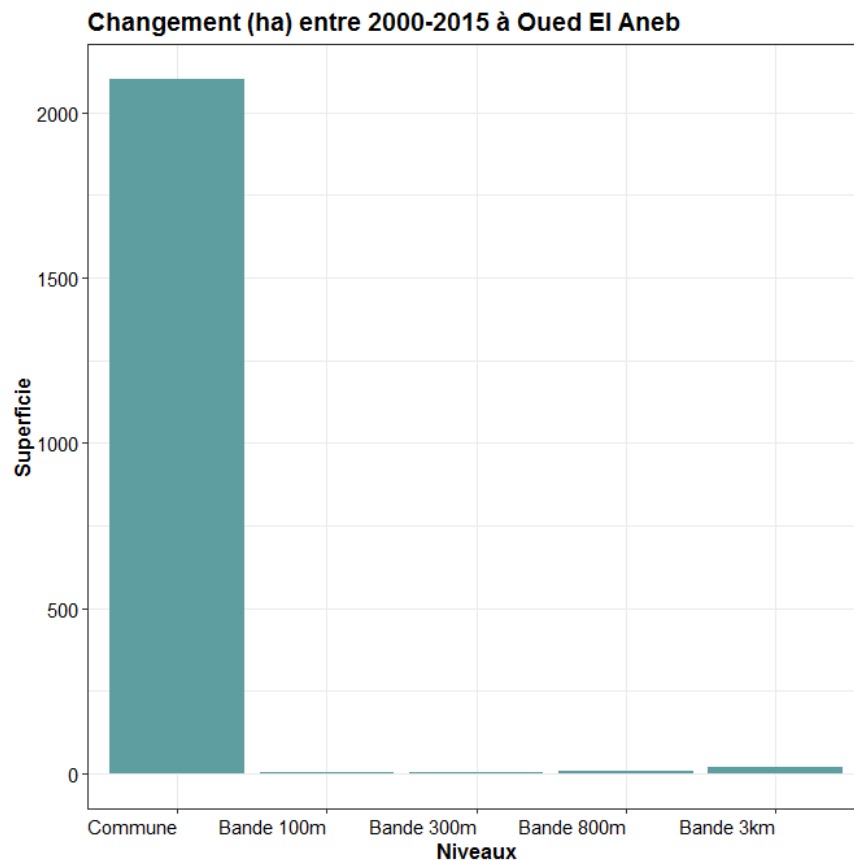


Figure 45. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

2.3.2. Changement entre 2015 et 2019

2.3.2.1. Analyse qualitative

Selon la figure 46, le changement (zones en rouge) est plus perceptible au niveau de l'aire naturelle entre les latitudes 36°51' N, 36°54' N et les longitudes 7°33' E, 7°40' E ainsi qu'au niveau du site de la nouvelle ville de Draa Erich. D'autre part, nous observons des zones en vert indiquant l'augmentation du couvert végétal, ces dernières sont observées sur le site localisé à 36°55'N, 7°33'E, ce site particulier a connu une diminution considérable du couvert végétal entre 2000 et 2015, cela indique que ce changement n'est pas un changement stable et qu'il est très probablement dû à la dynamique de la végétation caractéristique de ce site. En effet, si ce changement a été dû aux activités d'artificialisation entre 2000 et 2015, il aurait été détecté comme une surface inchangée entre 2015 et 2019, sauf que si le processus d'artificialisation est toujours en cours, auquel cas il aurait été détecté comme une diminution du couvert végétal par la différence-NDVI. Par conséquent, nous observons quelques zones en rouge au niveau de la nouvelle ville de Draa Erich, parce qu'il est très probable que le processus d'urbanisation de ce site soit toujours en cours entre 2015 et 2019. En outre, dans les cartes de différences précédentes, nous avons observé certains types de chemins qui se terminent sur le site repéré à la latitude 36°55' N et la longitude 7°31' E, ces chemins ont été détectés comme des surfaces inchangées entre 2015 et 2019, de plus sur ce site, la diminution de la végétation est également observée. Par ailleurs, aucun changement remarquable n'est observé au niveau des bandes littorales.

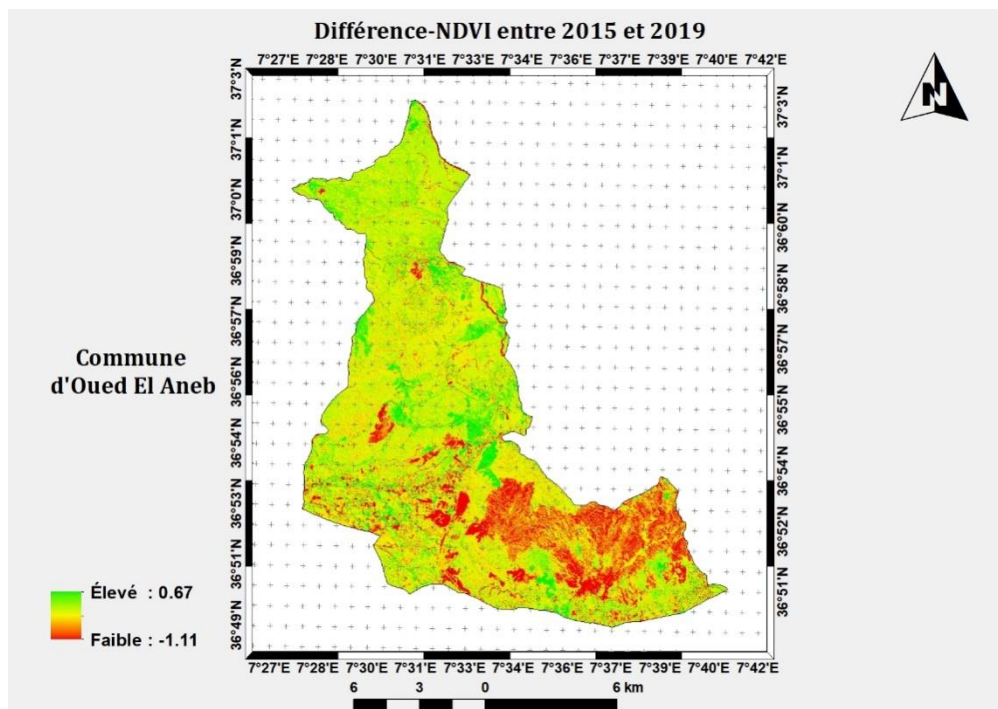


Figure 46. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune d'Oued El Aneb »

La figure 47 montre la commune d'Oued El Aneb sous deux vues, celle de gauche représente la composition colorée « végétation saine » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019 (Fig. 47-A) et celle de droite représente l'image de la cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV (Fig. 47-B). D'après la figure 47-A, la végétation saine est affichée en rouge vif, les sols nus (y compris les champs agricoles récoltés) sont affichés en vert et le milieu urbain est indiqué en cyan et en blanc (voir les figures 48-A et 48-B). En outre, la ligne blanche observée sur les deux images sert à délimiter l'aire naturelle du massif de l'Edough qui est située au nord de celle-ci, alors qu'au sud se trouvent les zones urbaines d'Oued El Aneb, de Draa Erich, d'Oued Zied, de Kherraza et de la nouvelle ville de Draa Erich (polygone en rouge). Sur l'image de cohérence (Fig. 47-B), les sols à des valeurs de cohérence élevées sont indiqués en gris représentant les zones urbaines ainsi que de vastes sols nus au niveau de l'aire naturelle qui se caractérise par un relief montagneux où l'élévation varie de 0 à 937 mètres (voir annexe 13). À partir de l'observation de la figure 47-A, nous pouvons voir de larges sols nus (indiquées en vert) au niveau de cette région montagneuse, ce qui confirme que les sols nus à des altitudes élevées maintiennent également un niveau élevé de cohérence. Par ailleurs, les zones délimitées par les polygones blancs ont un couvert végétal dense, ces dernières sont indiquées par de faibles valeurs de cohérence (en noir), ce qui confirme que les zones forestières (boisées) généralement ne montrent pas un niveau de cohérence suffisant. En outre, la zone délimitée par le polygone bleu représente des parcelles agricoles, également ayant de faibles valeurs de cohérence.

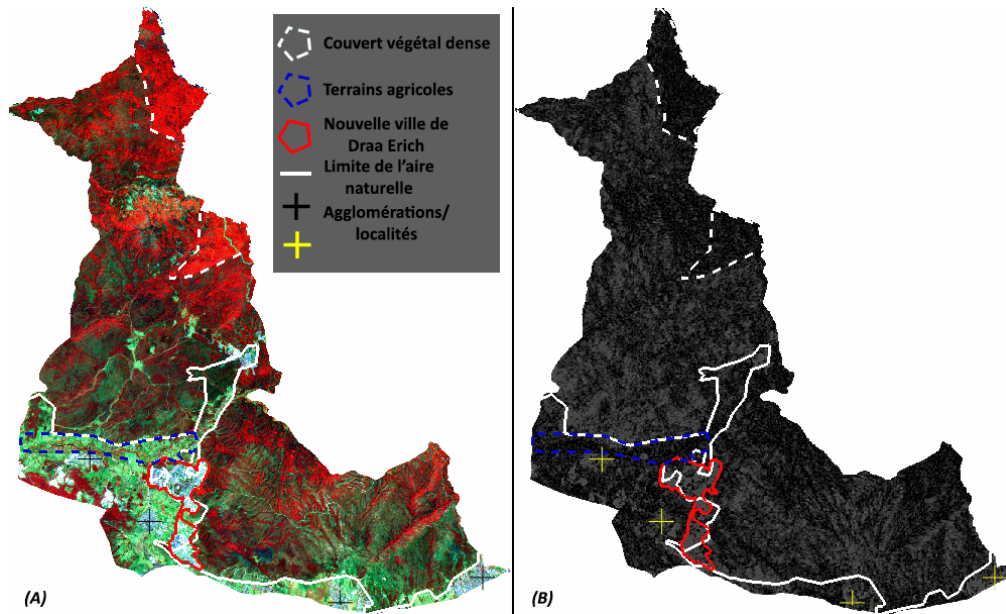


Figure 47. Commune d'Oued El Aneb, (A) Composition colorée « végétation saine » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV

La figure 48 montre une vue d'ensemble du site de la nouvelle ville de Draa Erich. Nous pouvons y constater visuellement l'évolution des sols artificialisés (bâties et revêtus) entre 2015 et 2019. Les figures 48-A et 48-B représentent la composition colorée « végétation saine » des images Sentinel-2 MSI respectivement en 2015 et en 2019 tandis que, les figure 48-C et 48-D représentent la classification de la cohérence interférométrique en 2015 et en 2019. Cette figure démontre bien que la couche de cohérence est très efficace pour détecter l'évolution des zones urbaines.

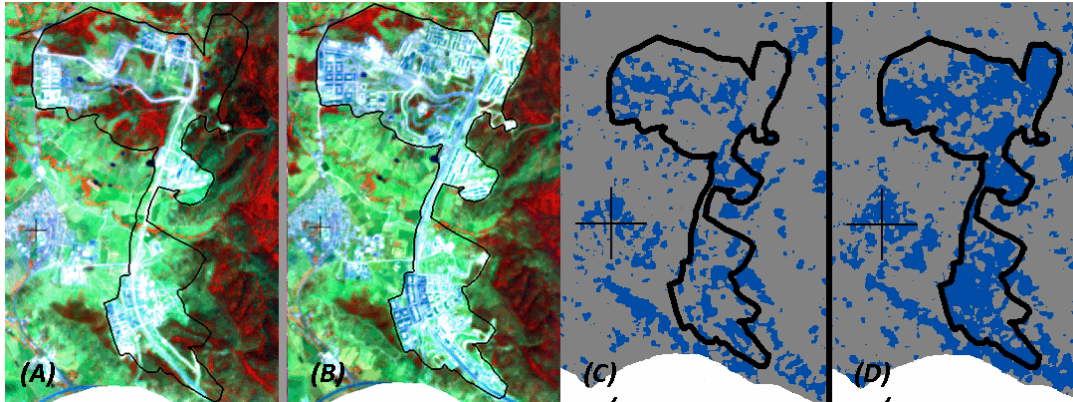


Figure 48. Vue d'ensemble du site de la nouvelle ville de Draa Erich (A) et (B) Composition colorée « végétation saine » des images Sentinel-2 MSI respectivement de 2015 et de 2019, (C) et (D) Classification de la cohérence interférométrique de 2015 et de 2019

La cohérence interférométrique s'est avérée utile pour la cartographie des zones urbaines au niveau des communes d'Annaba et d'El Bouni. Ces dernières sont généralement caractérisées par une faible topographie; ce facteur d'élévation représente sans doute la raison pour laquelle les résultats ont été concluants. En revanche, dans le cas de la commune d'Oued El Aneb, l'estimation de la cohérence présente une certaine confusion du fait qu'elle est essentiellement liée aux zones montagneuses dénudées au niveau de l'aire naturelle, lesquelles ont maintenu des niveaux élevés de cohérence. Afin d'éliminer cette confusion, nous avons numérisé un polygone qui exclut le périmètre de l'aire naturelle pour se focaliser sur la partie sud de la commune qui comprend les zones urbaines, les champs agricoles parmi d'autres types de sols, au niveau de laquelle les terres sont généralement plates et l'élévation varie de 0 à 104 mètres (voir annexe 13). L'objectif de l'utilisation de cette couche (polygone) est d'estimer la superficie et l'évolution des zones urbaines d'après les résultats de la classification de la cohérence interférométrique. Le changement qui survient dans cette partie qui inclut les zones urbaines est plus susceptible d'être attribué aux processus d'artificialisation. D'autre part, le changement survenu au niveau de l'aire naturelle est peut-être dû aux activités d'artificialisation (activités minières par ex.).

2.3.2.2. Analyse quantitative

Les figures 49 et 50 représentent les cartes de la classification d'images de cohérence de la commune d'Oued El Aneb, dans lesquelles le bleu indique la classe des valeurs élevées représentant particulièrement les zones urbaines et les sols nus à des altitudes élevées tandis que, le gris montre la classe de faibles valeurs (autres caractéristiques de surface).

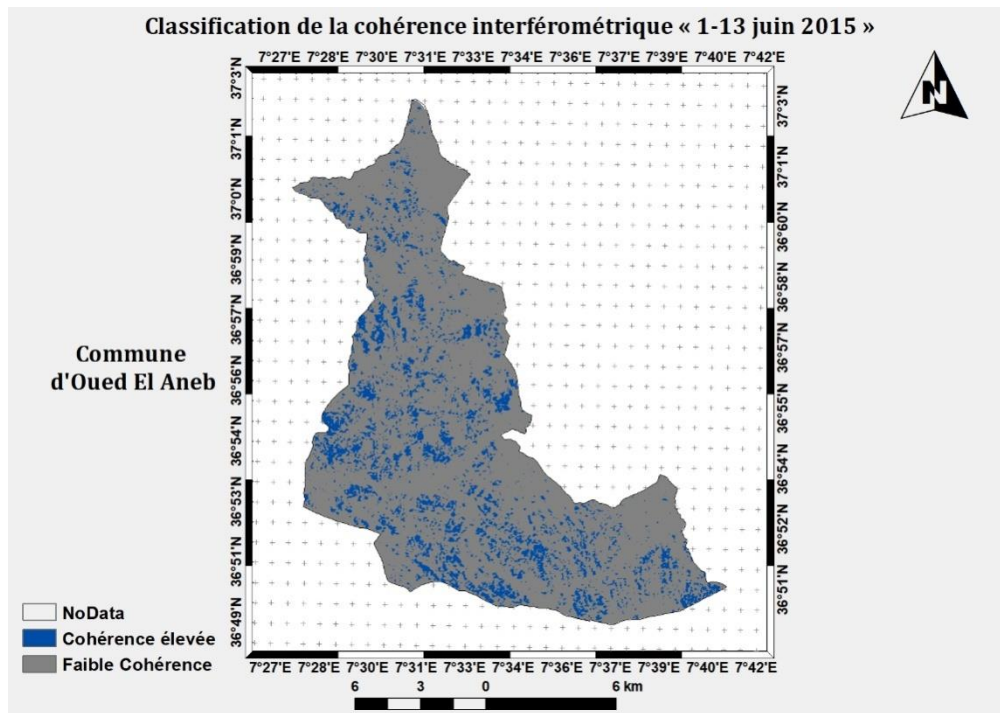


Figure 49. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1er et le 13 juin 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

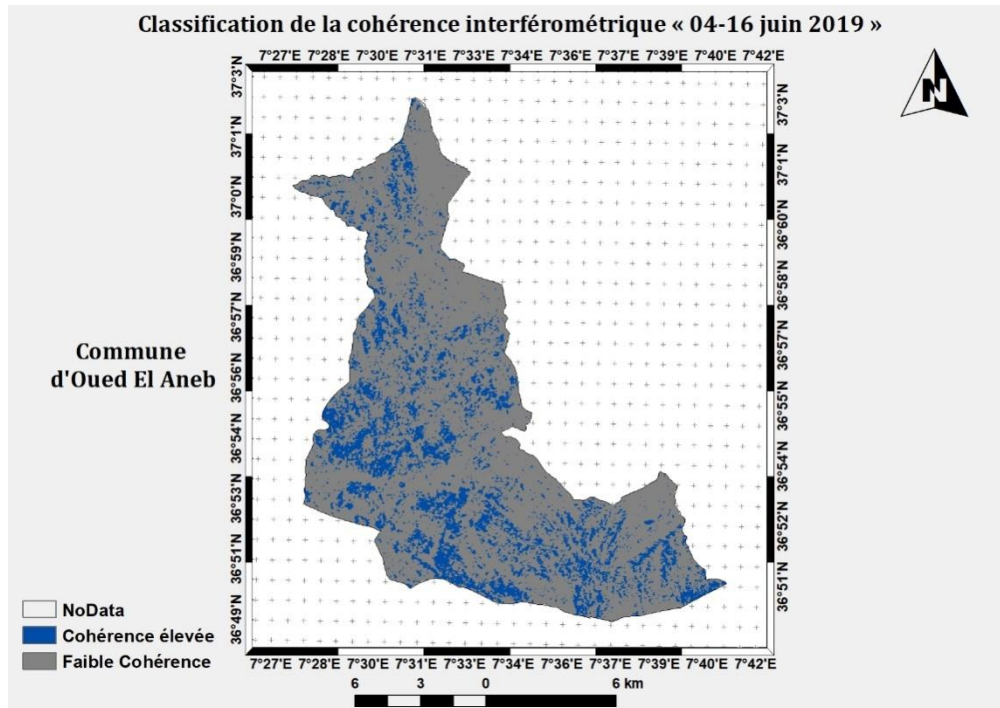


Figure 50. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Oued El Aneb »

Les tableaux 25 et 26 représentent les résultats de la classification pour les deux dates et le tableau 27 indique la comparaison de ces résultats.

Tableau 25. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1er et le 13 juin 2015 « Commune d'Oued El Aneb »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	14.212	26.920	2692	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	1.613	0.059	5.9	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	6.696	0.871	87.1	

Tableau 26. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune d'Oued El Aneb »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	19.909	37.711	3771.1	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	0.000	0.000	0.0	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	6.250	0.813	81.3	

Tableau 27. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Oued El Aneb »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	+5.697	+10.791	+1079.1	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	0	0	0	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	0	0	0	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	-1.613	-0.059	-5.9	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	-0.446	-0.058	-5.8	

La comparaison des classifications a révélé une augmentation considérable des sols à des valeurs de cohérence élevées entre 2015 et 2019 ; ces dernières sont des sols nus à des altitudes élevées et des sols urbains. Cette augmentation a été estimée à 1079.1 ha au niveau de la commune d'Oued El Aneb. Par ailleurs, aucun changement n'est observé au niveau des bandes littorales de 100 m et de 300 m tandis qu'au niveau des bandes littorales de 800 m et de 3 km, le changement a été indiqué par des valeurs négatives (Fig. 51). Ceci est peut-être dû à l'augmentation de la végétation au niveau de ces zones naturelles où l'élévation varie de 312 à 728 mètres. Les bandes littorales sont incluses dans la région naturelle qui se caractérise par l'absence d'établissements humains et le changement y est principalement imprévisible.

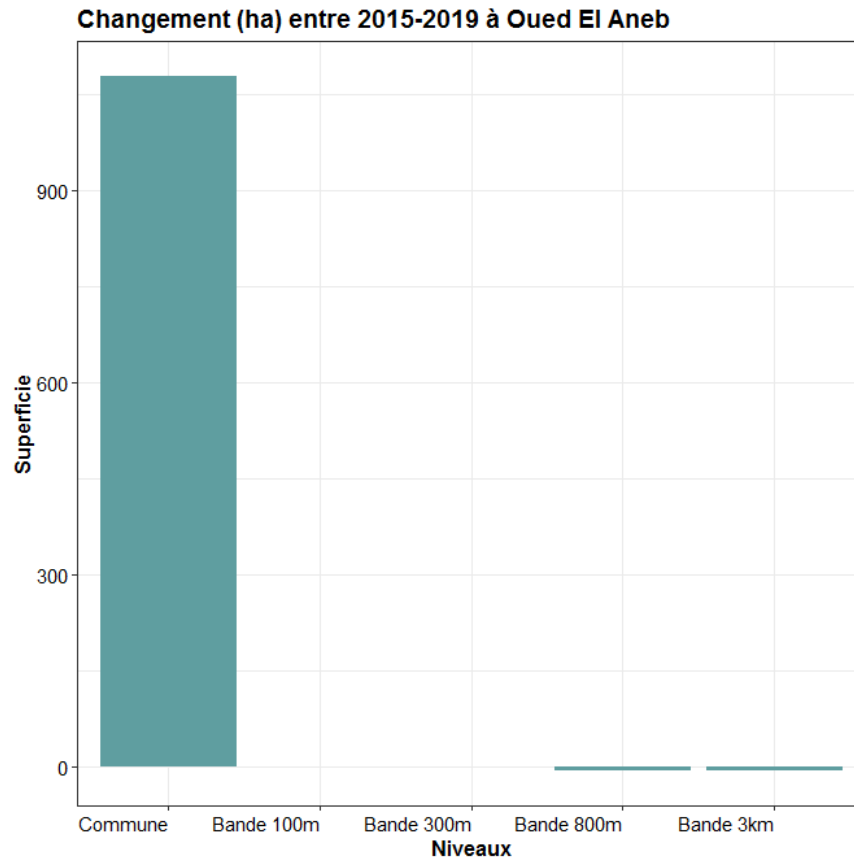


Figure 51. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats de classifications de la cohérence interférométrique « Commune d'Oued El Aneb »

Le changement au niveau de la commune entre 2015 et 2019 a été estimé à 1079.1 ha. Cette valeur est significative d'une manière générale sur le changement qui nous intéresse. En ce qui concerne, l'estimation du changement au niveau de la partie sud de la commune (où se localisent les zones urbaines), à cet égard nous avons opté pour l'utilisation des résultats issus de l'extraction par masque à l'aide de la couche SIG vecteur de la partie sud de la commune d'Oued El Aneb. La superficie de cette couche est d'environ 39.3 km² et représente 20.74% de la superficie de la commune. Par ailleurs, les sols artificialisés ont été estimés à 777.3 ha en 2015 et à 999.7 ha en 2019, par conséquent leur évolution était de 222.4 ha.

2.4. Commune de Seraïdi

Nous n'avons pas pu disposer du POS de la commune de Seraïdi. Pour valider et interpréter nos résultats, nous avons eu recours à la confrontation des cartes tels que « dNDVI-dEBBI-Composition colorée » ou « Cohérence-dNDVI-Composition colorée ».

2.4.1. Changement entre 2000 et 2015

2.4.1.1. Analyse qualitative

La figure 52 représente l'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015 en composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune de Seraïdi. Le relief montagneux est prédominant (massif de l'Edough) où l'élévation du terrain varie de 0 à 1003 mètres (Mont Bou Zizi) (voir annexe 14). En revanche, le symbole de localisation (+) repère ; l'agglomération sub-urbaine de Seraïdi (A), le village de Bou Zizi (B) et le village d'Aïn Barbar (C), les polygones en rouge définissent les périmètres de la ville de Seraïdi et du village de Bou Zizi. En dehors de ces établissements humains, le reste de la région est inclus dans le périmètre de l'aire naturelle du massif de l'Edough.

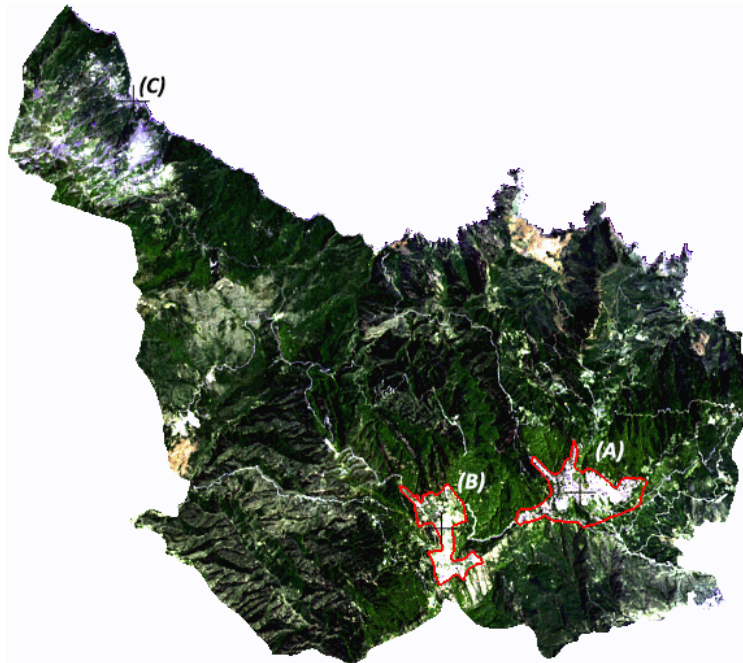


Figure 52. Composition colorée « urbain fausses couleurs » d'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015 « Commune de Seraïdi »

Le changement survenu entre 2000 et 2015 dans la commune de Seraïdi est indiqué dans les cartes des différences ci-dessous (Figs. 53 et 54).

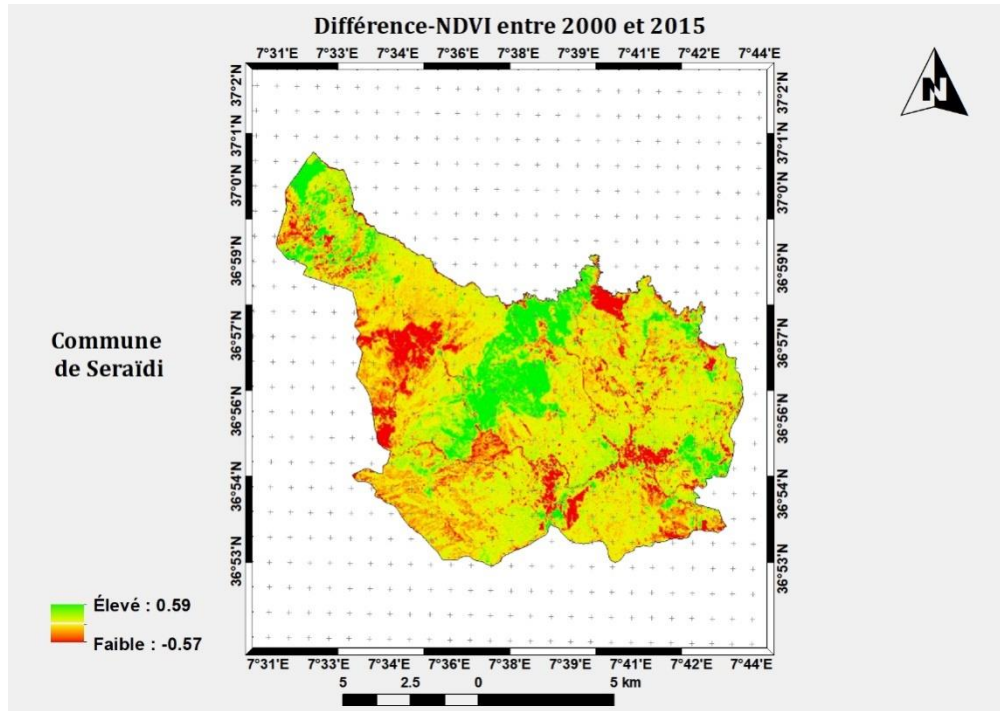


Figure 53. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »

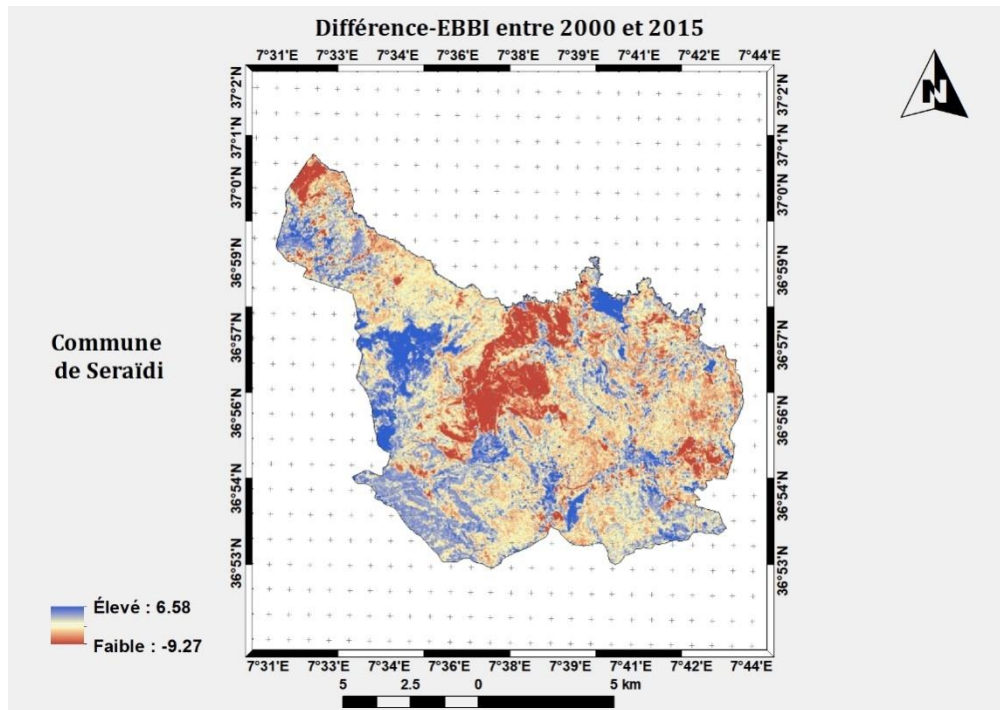


Figure 54. Différence-E-BBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »

D'une façon générale, les formes du changement sont perceptibles sur l'ensemble de la scène. Ces dernières sont observées au niveau de Seraïdi et de Bou Zizi. Concernant l'aire naturelle, le changement est remarqué à l'ouest sur le site repéré à la latitude 36°57' N et la longitude 7°34' E, au niveau de la région d'Aïn Barbar et au nord sur le site localisé à 36°58'N, 7°40'E. Par ailleurs, nous observons une augmentation assez considérable du couvert végétal au niveau de la zone qui est situé à la latitude 36°56'N et la longitude 7°38'E.

2.4.1.2. Analyse quantitative

L'augmentation des sols artificialisés et des sols nus entre 2000 et 2015 dans la commune de Seraïdi est indiquée par les zones en bleu (Fig. 55). Cette augmentation a été calculée au niveau de la commune et au niveau de ses bandes littorales (Tab. 28).

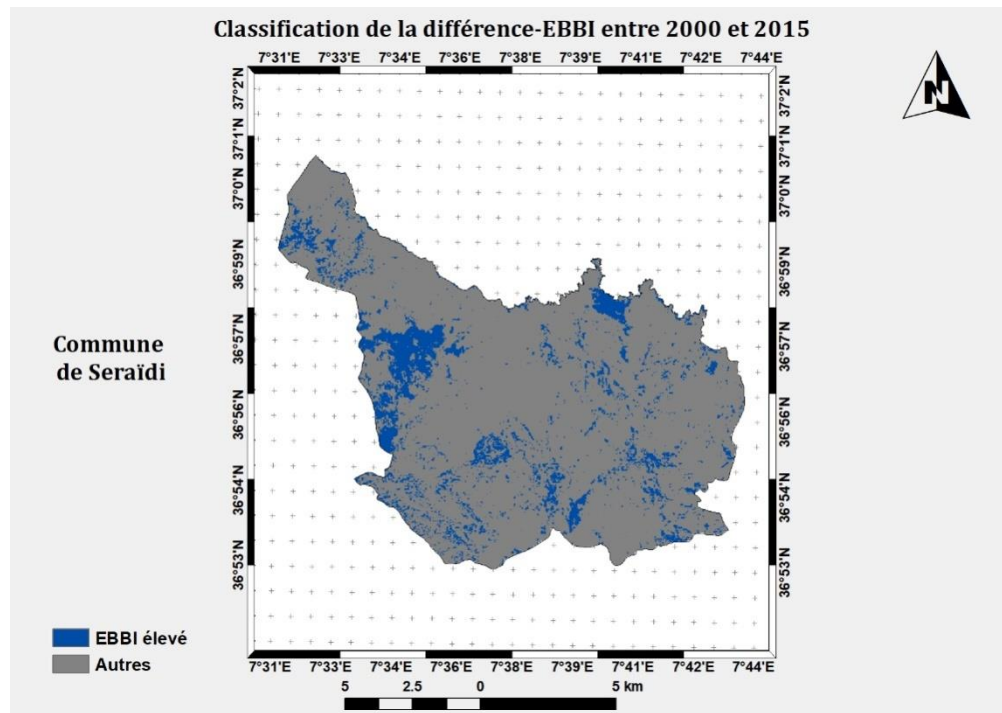


Figure 55. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »

Tableau 28. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	12.670	17.259	1725.9	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	25.510	0.711	71.1	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	14.314	1.042	104.2	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	11.268	1.962	196.2	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	11.541	6.955	695.5	

D'après les résultats indiqués dans le tableau 28, l'évolution des sols artificialisés et des sols nus a été estimée à 12.67% de la superficie de la commune de Seraïdi soit 17.259 km² ou bien 1725.9 ha. Dans ce cas, cette estimation est plus probablement liée aux sols nus à l'exception des changements observés autour de la ville de Seraïdi et du village de Bou Zizi ; ces changements sont plus susceptibles d'être liés au processus d'artificialisation des sols. D'autre part, l'évolution au niveau des bandes littorales a été estimée respectivement à 71.1, 104.2, 196.2 et 695.5 hectares (Fig.56). La bande littorale de 3 km représente environ 44.24% de la superficie de la commune de Seraïdi. Cette dernière englobe environ 40.29% du changement survenu entre les deux dates. Ce changement n'est probablement pas lié aux activités d'artificialisation en raison de l'inexistence d'établissements humains au niveau de ces espaces naturels à l'exception du petit village d'Aïn Barbar à l'extrême nord-est. Le changement au niveau de la ville de Seraïdi (Chef-lieu) a été extrait à l'aide de la couche SIG vecteur de leur périmètre. Par conséquent, ce changement a été estimé à environ 75 ha et il est très probable que cela soit dû au processus d'artificialisation.

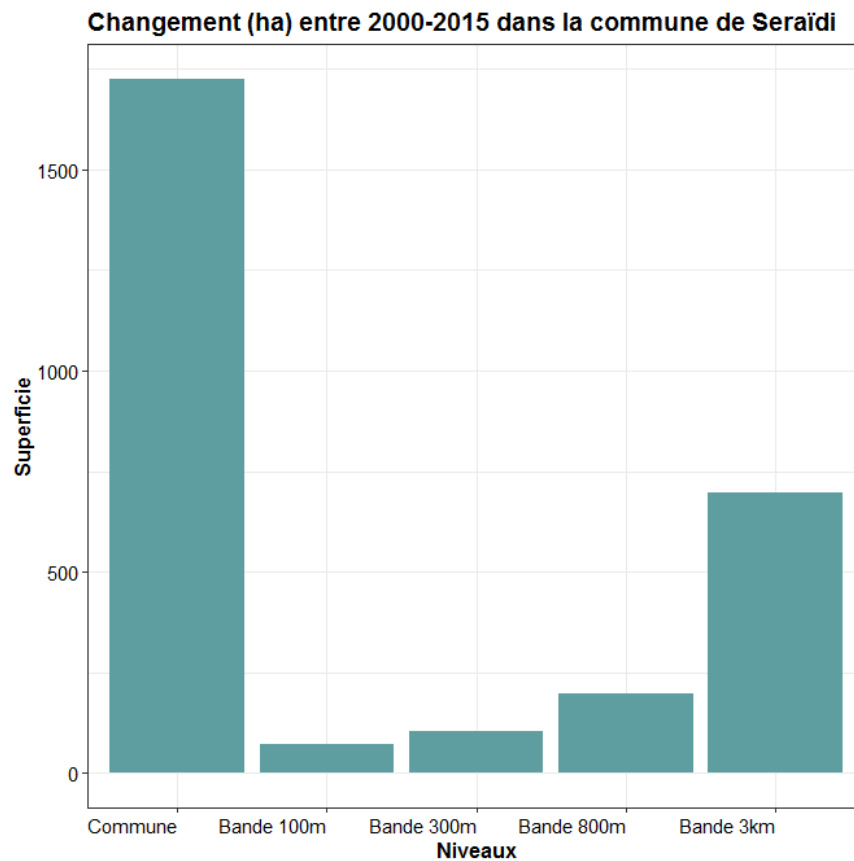


Figure 56. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Seraïdi »

2.4.2. Changement entre 2015 et 2019

2.4.2.1. Analyse qualitative

Selon la figure 57, les formes du changement (zones en rouge) sont plus perceptibles dans la partie sud-ouest au niveau de la région localisée à la latitude 36°53' N et la longitude 7°36' E et avec un degré moindre dans la partie sud-est près de Bou Zizi à 36°54' N, 7°41'E. D'autre part, nous observons des formes en vert indiquant l'augmentation du couvert végétal, sur le site repéré à la latitude 36°57' N et la longitude 7°34' E et le site localisé à 36°58' N, 7°40'E. Ces sites particuliers ont connu une diminution du couvert végétal entre 2000 et 2015. Ceci démontre que les changements qui se sont produits dans ce milieu naturel sont des changements instables. Cependant, au niveau de la ville de Seraïdi, les surfaces sont particulièrement apparues en jaune car les valeurs NDVI sont presque les mêmes en 2015 et en 2019, ce qui signifie pratiquement que les changements survenus entre 2000 et 2015 sont très probablement dus à l'artificialisation des sols.

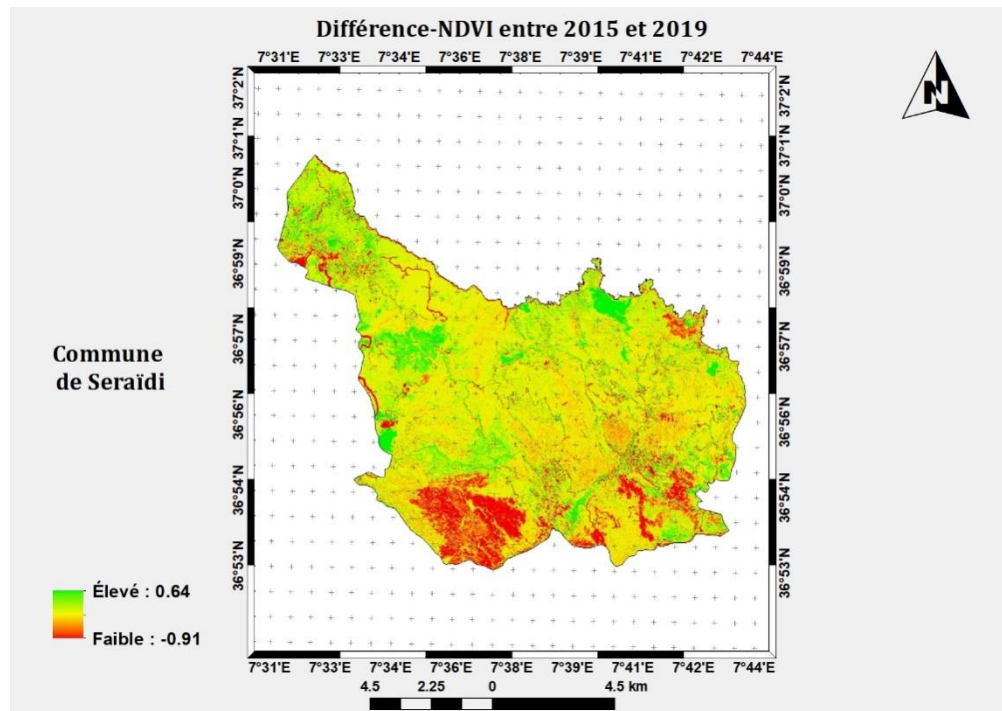


Figure 57. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune de Seraïdi »

La figure 58 montre la commune de Seraïdi sous deux vues, celle de gauche représente la composition colorée « végétation saine » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019 (Fig. 58-A) et celle de droite représente l'image de la cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV (Fig. 58-B). La figure 58-A affiche la végétation saine en rouge vif, tandis que les sols nus et les sols artificialisés sont indiqués en vert et en cyan. Sur les deux images, les polygones indiquent les périmètres de Seraïdi (a) et de Bou Zizi (b). Selon l'image de cohérence, les sols à des valeurs de cohérence élevées sont représentés en gris (Fig. 58-A). Dans ce cas, ces derniers sont principalement des sols nus à des altitudes élevées, la zone urbaine de Seraïdi (853 mètres d'altitude) ainsi que les sols bâtis et les sols nus de Bou Zizi (981 mètres d'altitude). En effet, par l'observation des deux images nous pouvons constater que les sols nus à des altitudes élevées particulièrement sur les parties nord-ouest, sud-ouest et sud-est, sont indiqués en vert et en cyan selon la composition colorée et en gris sur l'image de cohérence. Par ailleurs, les zones forestières de l'Edough sont montrées en rouge vif (végétation saine) selon la composition colorée et en noir selon l'image de cohérence, car ces dernières ont de faibles valeurs de cohérence.

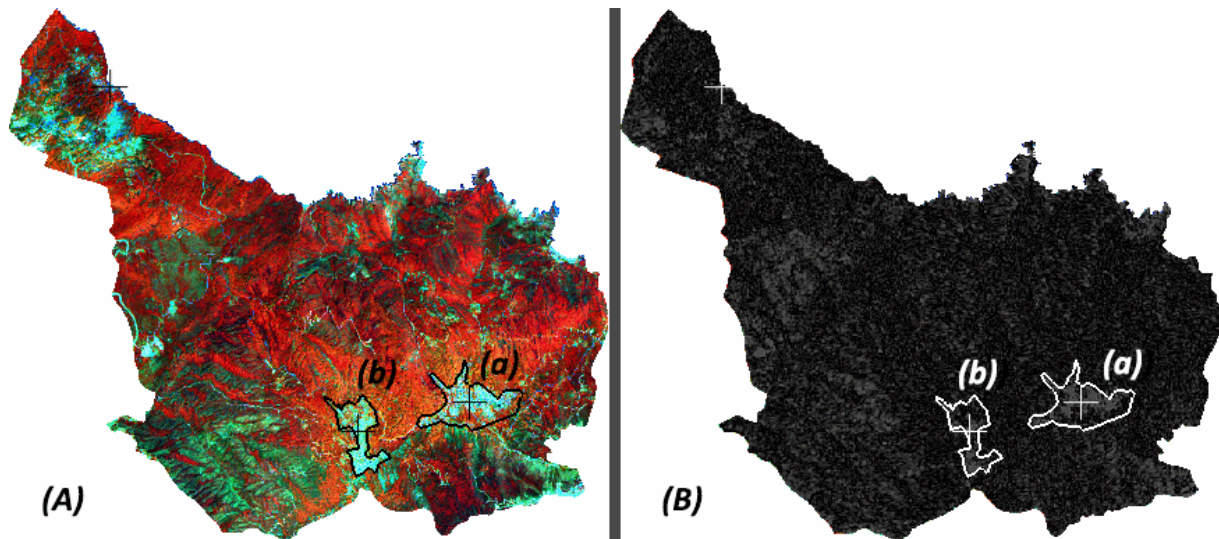


Figure 58. Commune de Seraïdi, (A) Composition colorée « végétation saine » d'image Sentinel-2 MSI vue le 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV

2.4.2.2. Analyse quantitative

Les figures 59 et 60 représentent les cartes de la classification des images de cohérence de la commune de Seraïdi, dans lesquelles le bleu affiche la classe des valeurs élevées ; particulièrement les zones montagneuses dénudées et les sols urbains. D'autre part, le gris montre la classe de faibles valeurs (autres caractéristiques de surface).

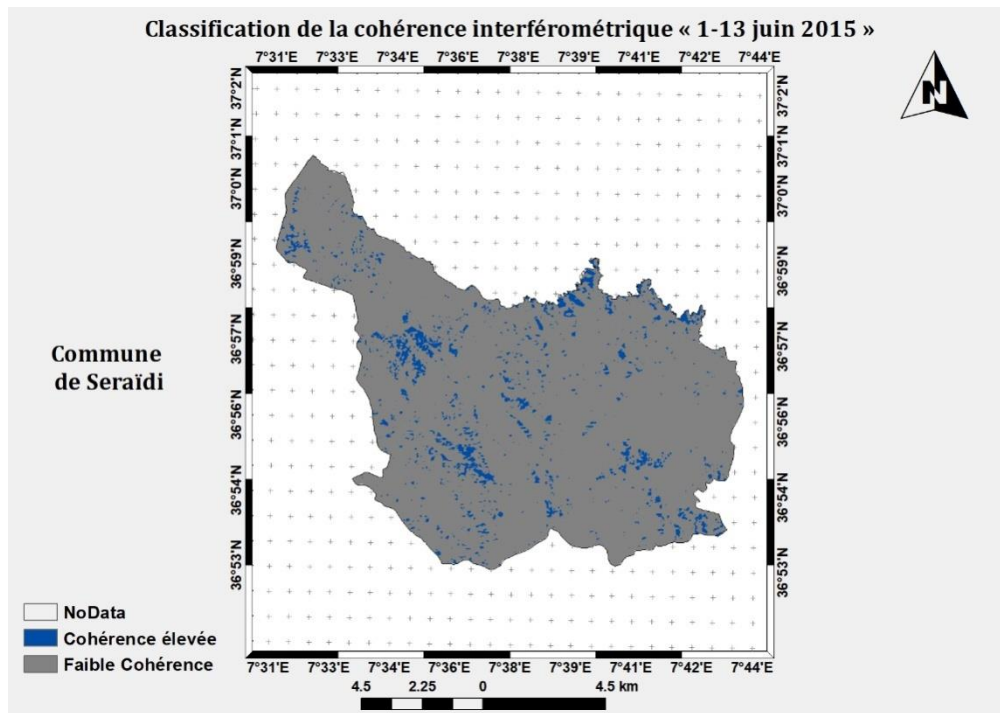


Figure 59. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune de Seraïdi »

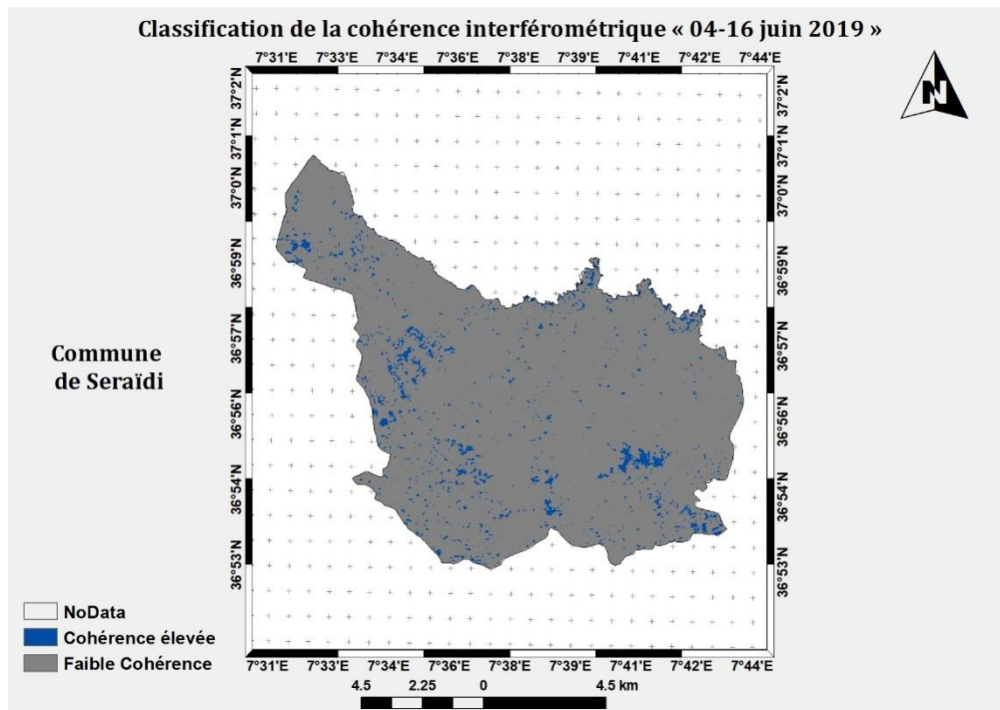


Figure 60. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Seraïdi »

Les tableaux 29 et 30 représentent les résultats de la classification pour les deux dates et le tableau 31 indique la comparaison de ces résultats.

Tableau 29. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1er et le 13 juin 2015 « Commune de Seraïdi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	5.875	8.002	800.2	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	25.000	0.697	69.7	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	17.600	1.281	128.1	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	10.631	1.851	185.1	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	6.316	3.806	380.6	

Tableau 30. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Seraïdi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	4.401	5.995	599.5	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	23.404	0.652	65.2	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	12.500	0.910	91.0	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	6.623	1.153	115.3	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	3.831	2.308	230.8	

Tableau 31. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Seraïdi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	-1.474	-2.007	-200.7	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	-1.596	-0.045	-4.5	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	-5.1	-0.371	-37.1	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	-4.008	-0.698	-69.8	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	-2.485	-1.498	-149.8	

La comparaison des classifications a révélé une diminution des sols nus à des altitudes élevées entre 2015 et 2019, en raison de la prédominance du relief montagneuses sur la région, ceci s'explique probablement par l'augmentation du couvert végétal. Cette diminution a été estimée à 200.7 ha au niveau de la commune, tandis qu'au niveau des bandes littorales a été estimée respectivement à 4.5, 37.1, 69.8 et 149.8 hectares (Fig. 61). En revanche, les résultats de ces classifications issus de l'extraction par masque à l'aide de la couche SIG vecteur du périmètre de la ville de Seraïdi (chef-lieu) indiquent que, la superficie des sols artificialisés de la ville de Seraïdi a été estimée à 54 ha en 2015 et à 94.1 ha en 2019. Par conséquent, l'évolution était de 40.1 ha.

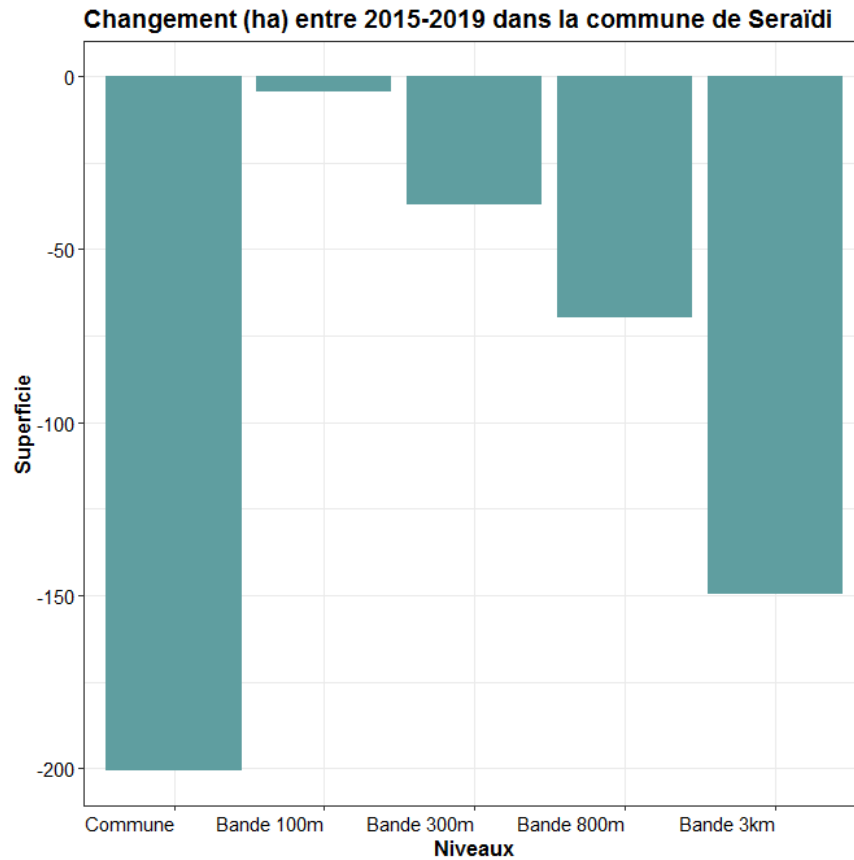


Figure 61. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Seraïdi »

2.5. Commune de Chetaïbi

Nous n'avons pas pu disposer du POS de la commune de Chetaïbi. Par conséquent, pour valider et interpréter nos résultats, nous avons eu recours à la confrontation des cartes tels que « dNDVI-dEBBI-Composition colorée » ou « Cohérence-dNDVI-Composition colorée ».

2.5.1. Changement entre 2000 et 2015

2.5.1.1. Analyse qualitative

La figure 62 représente l'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 juin 2015 en composition colorée « urbain fausses couleurs » de la commune de Chetaïbi. La région de Chetaïbi est de nature rurale, s'occupe la limite ouest du massif de l'Edough où l'élévation du terrain varie de 0 à 565 mètres (voir annexe 15). En revanche, le symbole de localisation (+)repère, l'agglomération semi-rurale de Chetaïbi (chef-lieu) (A) ; cette dernière est délimitée par la ligne en rouge, ainsi que les villages de Zgaa (B), d'Oued El Ghenem (C), de Zaouia (D) et d'El Azla (E). À l'exception de l'agglomération de Chetaïbi, le reste de la région est inclus dans le périmètre de l'aire naturelle du massif de l'Edough.

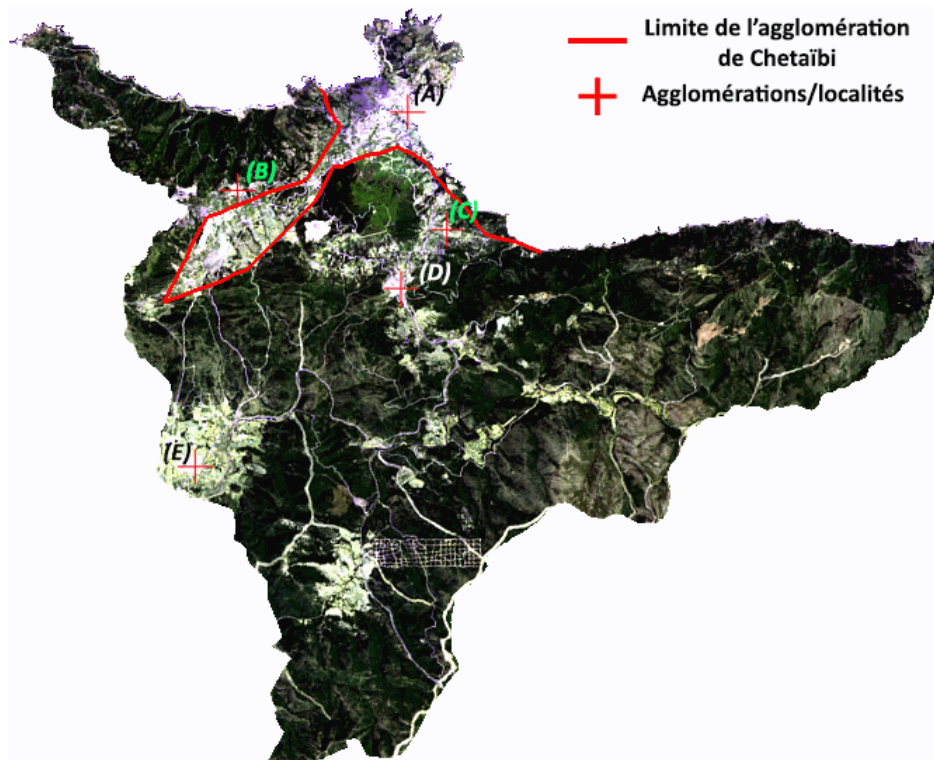


Figure 62. Composition colorée « urbain fausses couleurs » de l'image Landsat 8 OLI/TIRS du 29 Juin 2015 « Commune de Chetaïbi »

Le changement survenu entre 2000 et 2015 au niveau de la commune de Chetaïbi est indiqué dans les cartes des différences en dessous (Figs. 63 et 64).

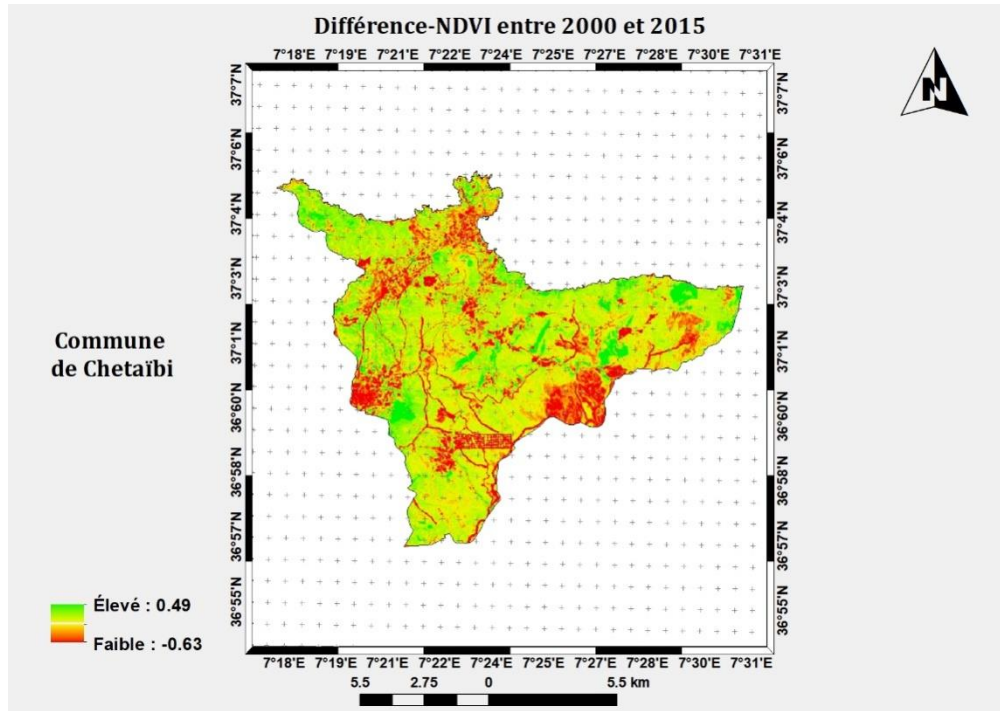


Figure 63. Différence-NDVI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »

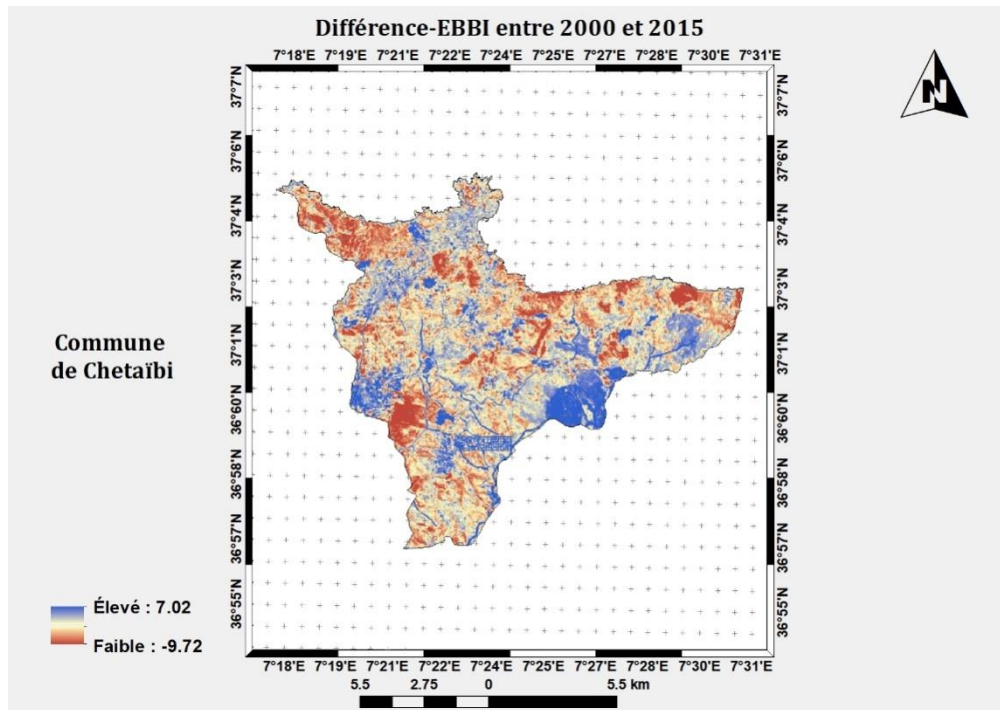


Figure 64. Différence-E-BBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »

D'une façon générale, les formes du changement sont perceptibles sur l'ensemble de la scène. Au niveau de l'agglomération de Chetaïbi (la zone délimitée en rouge sur la figure 62), nous constatons des formes dispersées qui s'étendent du nord au sud de cette zone. D'autre part, au niveau de l'aire naturelle nous observons, des formes de pistes qui s'étendent de façon aléatoire dans diverses directions et une sorte de quadrillage d'une forme rectangulaire au sud-est sur le site repéré à la latitude 36°60'N et les longitudes 7°22'E, 7°24'E. En outre, des changements considérables au niveau du village d'El Azla (36°60'N, 7°19'E) et à l'est sur le site localisé à 36°60' N, 7°27'E sont également constatés.

2.5.1.2. Analyse quantitative

L'augmentation des sols artificialisés et des sols nus entre 2000 et 2015 dans la commune de Chetaïbi est indiquée par les zones en bleu (Fig. 65). Cette augmentation a été calculée au niveau de la commune et au niveau de ses bandes littorales (Tab. 32).

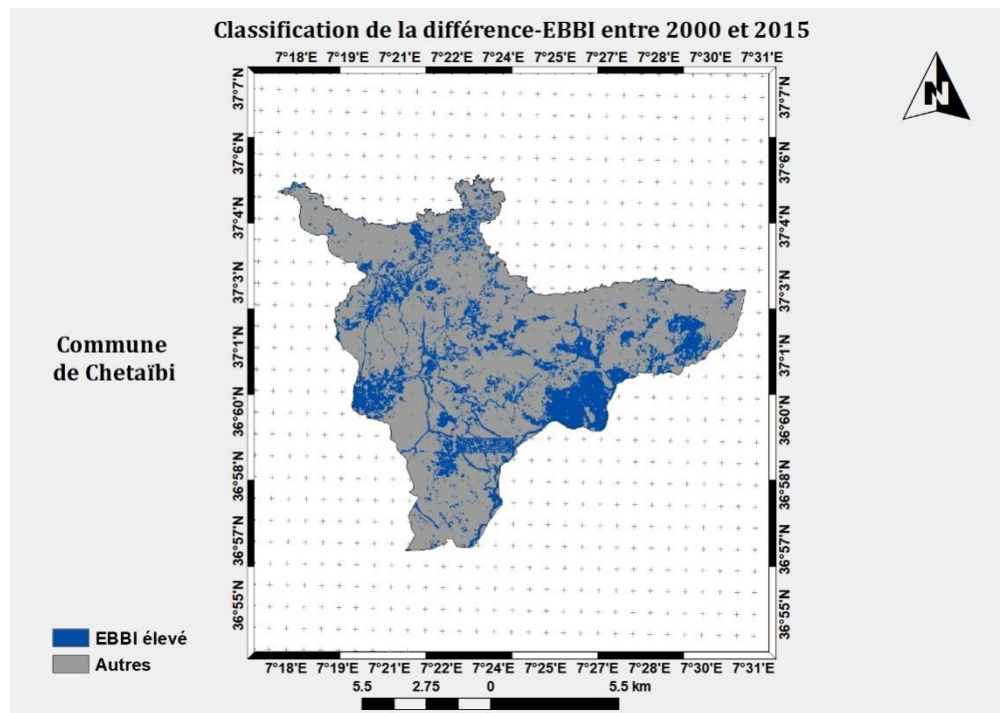


Figure 65. Classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »

Tableau 32. Résultats de la classification de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie
	%	km ²	ha
Au niveau de la commune	24.607	32.304	3230.4
Au niveau de la bande littorale de 100 m	17.195	0.579	57.9
Au niveau de la bande littorale de 300 m	13.269	1.202	120.2
Au niveau de la bande littorale de 800 m	13.265	2.812	281.2
Au niveau de la bande littorale de 3 km	20.196	12.479	1247.9

D'après les résultats indiquées dans le tableau 32, l'évolution des sols artificialisés et des sols nus a été estimée à 24.607% de la superficie de la commune de Chetaïbi soit 32.304 km² ou bien 3230.4 ha. D'autre part, l'évolution dans les bandes littorales a été estimée respectivement à 57.9, 120.2, 281.2 et 1247.9 hectares (Fig. 66). La bande littorale de 3 km représente à environ 47.06% de la superficie de la commune de Chetaïbi, cette dernière englobe environ 38.62% du changement survenu entre les deux dates. Au niveau de cette bande littorale, nous y localisons l'agglomération semi-rurale de Chetaïbi et les villages d'Oued El Ghenem, de Zgaa et de Zaouia. En outre, à l'exception du périmètre de l'agglomération de Chetaïbi, le reste de la région est inclus dans le périmètre de l'aire naturelle du massif de l'Edough. Il est à souligner que ces changements considérables sont anormaux et qu'il nécessite une enquête de terrain pour déterminer les causes et le type d'artificialisation exercé.

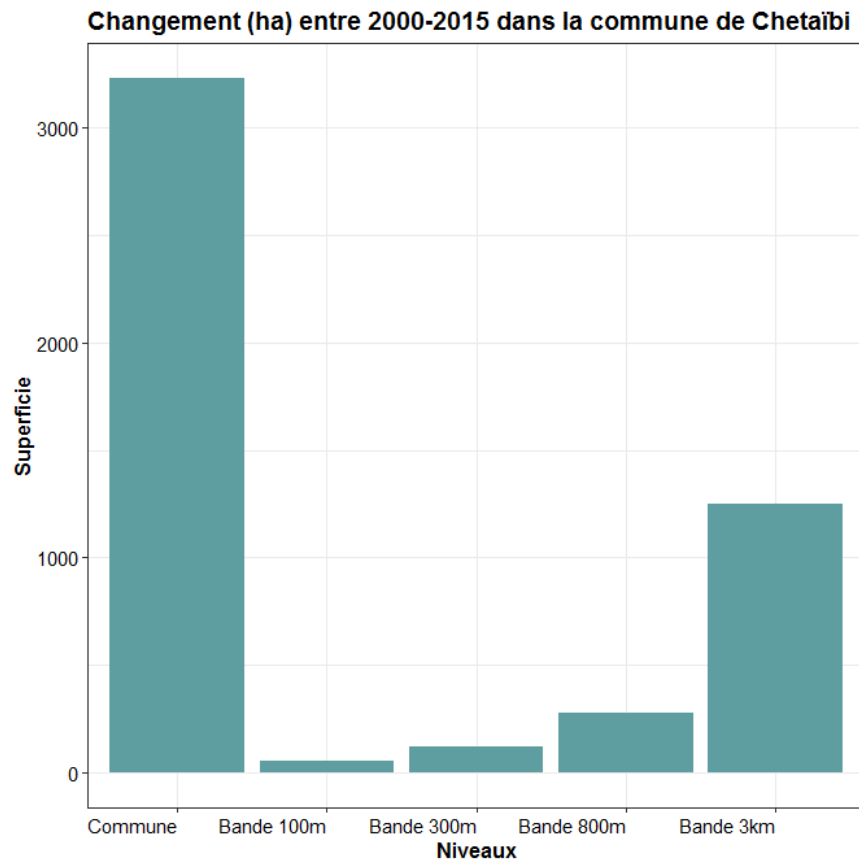


Figure 66. Résultats (en ha) de la différence-EBBI entre 2000 et 2015 « Commune de Chetaïbi »

2.5.2. Changement entre 2015 et 2019

2.5.2.1. Analyse qualitative

Les formes du changement (zones en rouge) sont dispersées sur l'ensemble de la scène et qu'ils ne sont pas très notables (Fig. 67). Cependant, certaines formes clairsemées sont observées dans le périmètre de l'agglomération de Chetaïbi. Au niveau de l'aire naturelle nous constatons, une forme de piste qui s'étend du village d'El Azla ($36^{\circ}60'N$, $7^{\circ}19'E$) au sud. Par ailleurs, des zones en vert sont apparentes à l'est sur le site repéré à la latitude $36^{\circ}60'N$ et la longitude $7^{\circ}27'E$, ce site particulier a connu une diminution du couvert végétal entre 2000 et 2015.

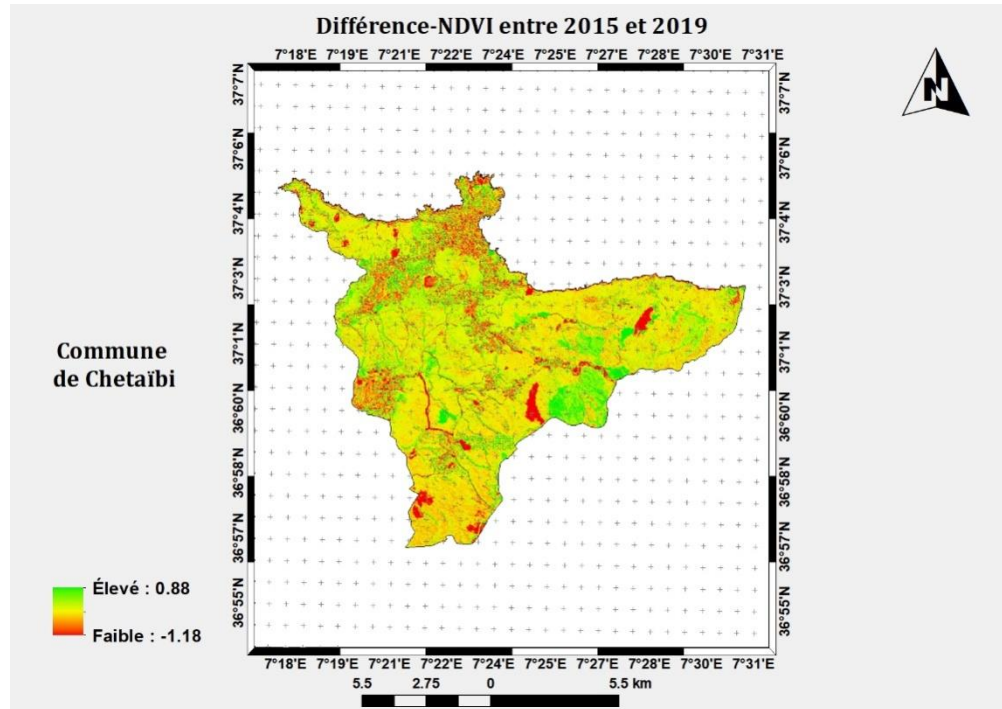


Figure 67. Différence-NDVI entre 2015 et 2019 « Commune de Chetaïbi »

La figure 68 montre une vue d'ensemble de la commune de Chetaïbi, celle de gauche représente la composition colorée « végétation saine » de l'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019 (Fig. 68-A) et celle de droite représente l'image de la cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV (Fig. 68-B). D'après la figure 68-A, la végétation saine est montrée en rouge vif, tandis que les sols nus et les sols artificialisés sont apparents en vert et en cyan. Par ailleurs, selon la figure 68-B, les zones urbaines et les sols nus à des altitudes élevées sont indiqués en gris (valeurs de cohérence élevées) tandis que, les autres surfaces (zones forestières, parcelles agricoles, sols nus à des faibles altitudes, etc.) sont affichées en noir (faibles valeurs de cohérence). Sur les deux images, les lignes et les polygones de délimitation représentent : la zone de l'agglomération de Chetaïbi (chef-lieu) (a), au niveau de laquelle le trait en rouge délimite la zone urbaine (Numérisation via Google Earth Pro), des zones à couvert végétal dense (b et c), une zone presque nue à des altitudes élevées (125 à 502 m) (d), une zone nue à des faibles altitudes (0 à 62 m) représente le village d'El Azla (e). Par l'observation de l'image de cohérence, nous constatons que la zone urbaine de Chetaïbi et la zone nue à des altitudes élevées (d) ont de valeurs de cohérence élevées (indiquées en gris). D'autre part, les zones à couvert végétal dense (b et c) ainsi que la zone nue à des faibles altitudes (e) ont de faibles valeurs de cohérence (indiquées en noir). Cela confirme encore une fois que, les zones urbaines et les zones montagneuses dénudées maintiennent des niveaux élevés de cohérence, tandis que les sols nus à des faibles altitudes et les zones forestières ne montrent pas des niveaux élevés de cohérence.

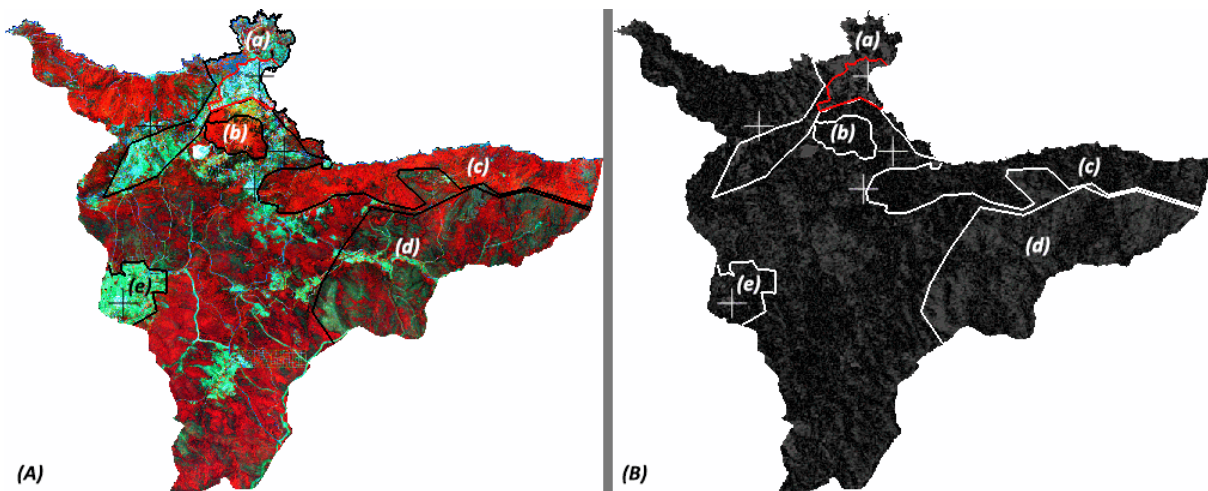


Figure 68. Commune de Chetaïbi, (A) Composition colorée « végétation saine » d'image Sentinel-2 MSI du 23 juillet 2019, (B) Image de cohérence interférométrique entre le 04 et le 16 juin 2019 en polarisation VV

2.5.2.2. Analyse quantitative

Les figures 69 et 70 montrent les cartes de la classification d'images de cohérence de la commune de Chetaïbi, dans lesquelles le bleu désigne la classe des valeurs élevées représentant particulièrement les zones montagneuses dénudées et la zone urbaine de Chetaïbi. D'autre part, le gris affiche la classe de faibles valeurs (autres caractéristiques de surface).

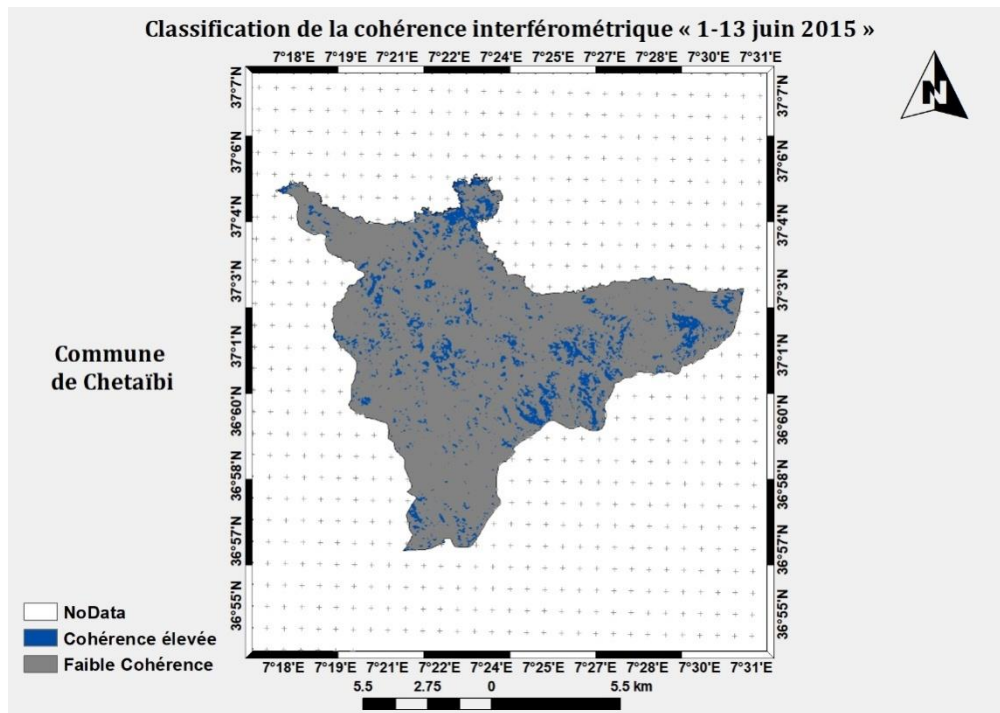


Figure 69. Classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune de Chetaïbi »

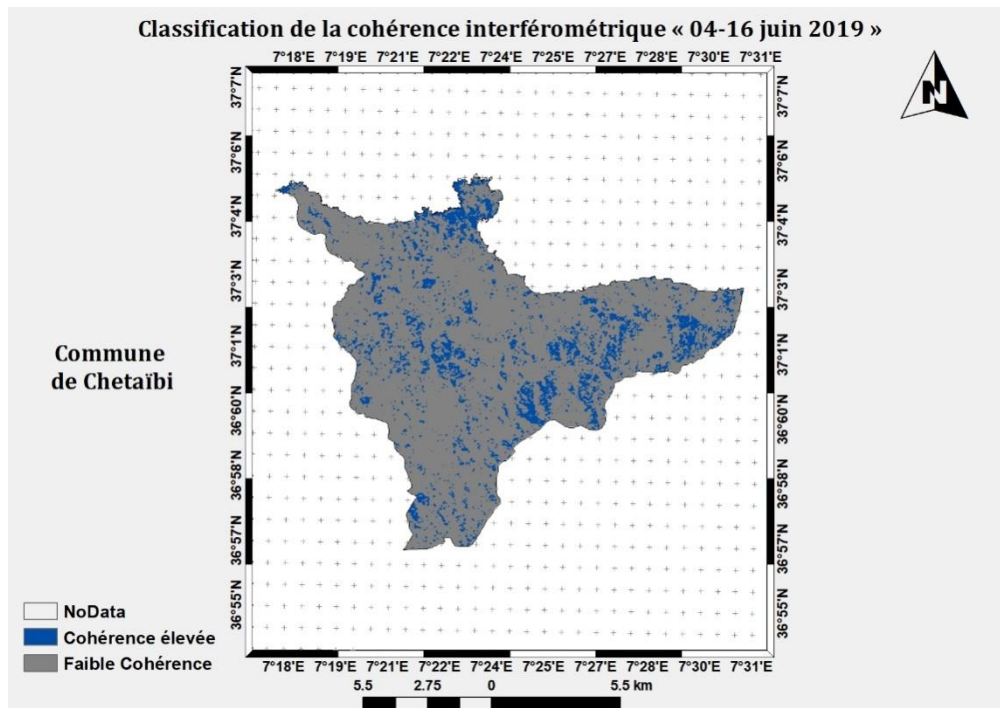


Figure 70. Classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Chetaïbi »

Les tableaux 33 et 34 résumant les résultats de la classification pour les deux dates et le tableau 35 représente la comparaison de ces résultats.

Tableau 33. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 1^{er} et le 13 juin 2015 « Commune de Chetaïbi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	10.667	14.003	1400.3	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	20.755	0.699	69.9	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	15.789	1.430	143	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	14.247	3.020	302	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	12.022	7.428	742.8	

Tableau 34. Résultats de la classification de la cohérence interférométrique entre le 4 et le 16 juin 2019 « Commune de Chetaïbi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	15.439	20.268	2026.8	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	32.727	1.102	110.2	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	24.026	2.176	217.6	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	20.330	4.309	430.9	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	17.767	10.978	1097.8	

Tableau 35. Comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Chetaïbi »

Différents niveaux	Pourcentage		Superficie	
	%	km ²	ha	
Au niveau de la commune	+4.772	+6.265	+626.5	
Au niveau de la bande littorale de 100 m	+11.972	+0.403	+40.3	
Au niveau de la bande littorale de 300 m	+8.237	+0.746	+74.6	
Au niveau de la bande littorale de 800 m	+6.083	+1.289	+128.9	
Au niveau de la bande littorale de 3 km	+5.745	+3.55	+355	

La comparaison des classifications a révélé une augmentation des sols à des valeurs de cohérence élevées entre 2015 et 2019, cette augmentation est essentiellement liée à des sols nus à des altitudes élevées, en raison de la prédominance du relief montagneux sur la région, de l'existence de localités rurales et de l'absence de grandes zones urbaines, à l'exception de la zone urbaine de Chetaïbi. Cette augmentation a été estimée à 626.5 ha au niveau de la commune, tandis qu'au niveau des bandes littorales a été estimée respectivement à 40.3, 74.6, 128.9 et 355 hectares (Fig. 71).

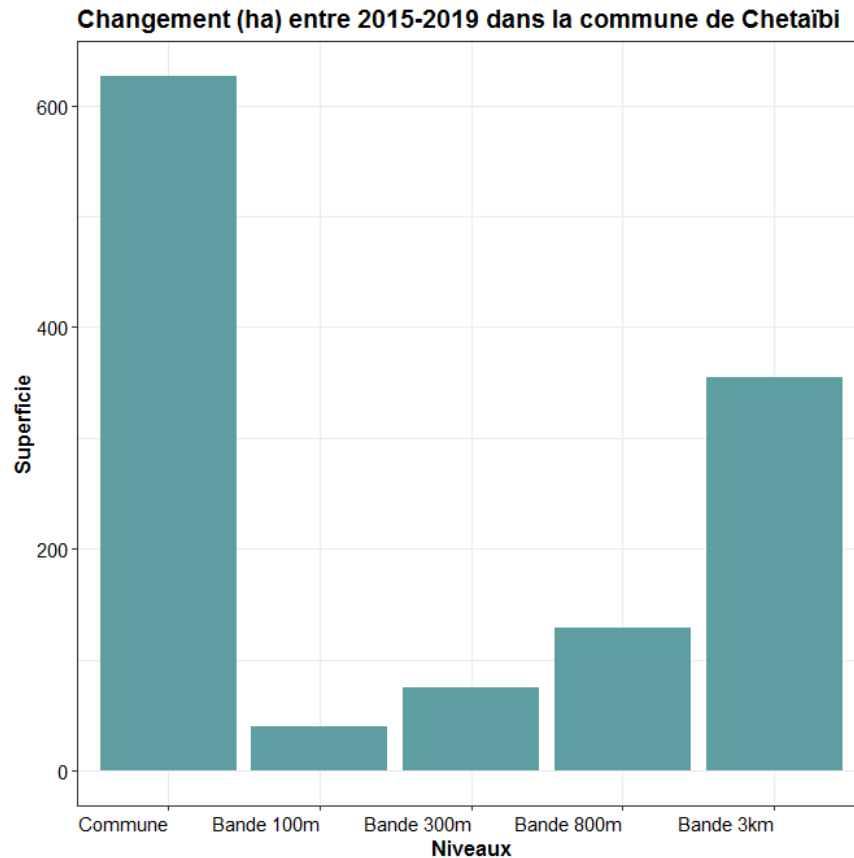


Figure 71. Résultats (en ha) de la comparaison des résultats des classifications de la cohérence interférométrique « Commune de Chetaïbi »

En revanche, les résultats de ces classifications issus de l'extraction par masque à l'aide de la couche SIG vecteur du périmètre de l'agglomération de Chetaïbi (chef-lieu) indiquent que, la superficie des sols artificialisés révélée par la cohérence a été estimée à 215 ha en 2015 et à 279 ha en 2019. Par conséquent, l'évolution a été estimée à 64 ha. D'autre part, les résultats issus de l'extraction par masque à l'aide de la couche SIG vecteur de la zone urbaine de Chetaïbi indiquent que la superficie des sols bâtis (urbain) a été estimée à 56.94 ha en 2015 et à 91.11 ha en 2019. En effet, l'évolution était de 34.17 ha.

3. Estimation de la superficie des zones urbaines

La classification de la cohérence interférométrique a pour but de réaliser une cartographie des zones urbaines des communes côtières de la wilaya d'Annaba. En fonction de la cohérence interférométrique les zones urbaines ainsi que les montagnes dénudées ont de valeurs de cohérence élevées. Nous avons constaté que le facteur d'élévation du terrain a eu une influence majeure sur les résultats de la classification et par conséquent ces résultats ont été appréciables pour estimer la superficie des zones urbaines dans le cas des communes d'Annaba et d'El Bouni en raison de leur topographie qui assez plate, tandis que dans le cas des communes d'Oued El Aneb, de Seraïdi et de Chetaïbi où le relief montagneux est prédominant (massif de l'Edough), à cet effet les résultats n'ont pas été appréciables en raison de l'existence de vastes zones montagneuses dénudées. Afin d'estimer la superficie des zones urbaines de ces 3 communes, nous avons isoler le périmètre de l'aire naturelle du massif de l'Edough pour se focaliser uniquement sur les zones urbaines.

Le tableau ci-dessous résume pour chaque commune côtière de la wilaya d'Annaba, la superficie actuelle (en 2019) de la zone urbaine et leur pourcentage par rapport à la superficie de la commune.

Tableau 36. Estimation de la superficie des zones urbaines des communes côtières de la wilaya d'Annaba en 2019 selon la classification de la cohérence interférométrique

Commune	Superficie (km ²)	Superficie de la zone urbaine		% p/r à la sup. de la commune
		Km ²	ha	
Annaba	47.74	19.89	1989	41.67
El Bouni	93.25	21.28	2128	22.82
Oued El Aneb	189.42	9.99	999	5.27
Seraïdi	136.22	0.94	94	0.69
Chetaïbi	131.28	0.91	91	0.69

Conclusion

Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif de cartographier et de quantifier l'augmentation des sols artificialisés au niveau des communes côtières de la wilaya d'Annaba entre 2000 et 2019 et aussi de réaliser une cartographie des zones urbaines, à l'aide d'images satellites à moyenne résolution spatiale et à libre accès (données ouvertes).

Le changement entre 2000 et 2015 a été estimé par la classification supervisée de la différence de l'indice « EBBI », en raison que, ses valeurs élevées illustrent l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus. Tandis que, entre 2015 et 2019, les images de cohérence ont été classées pour ensuite faire comparer les deux classifications afin d'estimer le changement survenu sur la base que les valeurs élevées de la cohérence interférométrique mettent en évidence les zones urbaines et par conséquent, une cartographie récente des zones urbaines a été réalisée.

Il est à souligner que, les montagnes dénudées sont aussi indiquées par des valeurs de cohérence élevées, ce facteur a introduit une complexité concernant la cartographie des zones urbaines dans les communes où le relief montagneux est prédominant. D'autre part, ce facteur était avantageux en ce qui concerne les activités d'artificialisation des sols, car si une zone montagneuse passe de l'état boisée à l'état dénudée, nous pouvons détecter et estimer ce changement selon la cohérence interférométrique car les zones boisées ont de faibles valeurs de cohérence.

L'augmentation des sols artificialisés est des sols nus au niveau des grandes zones urbaines, cas des communes d'Annaba et d'El Bouni est d'une manière générale due à l'urbanisation (extension des sols bâtis), ce qui a été confirmé selon le POS prescrits par le projet du PDAU dans le cas d'Annaba et aussi en raison que les superficies de leurs zones urbaines sont bien supérieures à celles des autres communes. En outre, la topographie de ces communes est assez faible et grâce à ce facteur d'élévation, les résultats de la cohérence étaient plus satisfaisants pour cartographier leurs zones urbaines par rapport aux communes d'Oued El Aneb, de Seraïdi et de Chetaïbi, dans lesquelles le relief montagneux est prédominant (massif de l'Edough) et vu que l'élévation du terrain d'une région détermine en grande partie son aptitude à l'urbanisation. En effet, l'artificialisation au niveau de ces régions est d'un très faible pourcentage dû aux activités d'urbanisation sauf que pour le cas d'Oued El Aneb où l'implantation du projet de la nouvelle ville de Draa Erich joue un rôle majeur dans le changement constaté.

D'après les résultats obtenus, les communes les plus touchées par ordre d'artificialisation sont respectivement ; Chetaïbi, Oued El Aneb, El Bouni, Seraïdi et Annaba. D'après ces résultats, nous constatons que les communes situées sur les hauteurs de l'Edough notamment Chetaïbi et Oued El Aneb sont les plus touchées. Afin de mieux connaître les types d'artificialisation exercés sur les paysages forestiers du massif de l'Edough qui représentent 57% du territoire du littoral de la wilaya d'Annaba, une enquête de terrain est indispensable à cet égard. De notre point de vue, l'artificialisation au niveau de ces régions montagneuses est due aux activités minières à cause de l'existence des mines de Kherraza, de Chetaïbi et de l'Edough (Aïn Barbar).

En fonction de la superficie de la zone urbaine par rapport à celle de la commune, les communes les plus urbanisées sont par ordre, Annaba (41.67% soit 19.89 km²), El Bouni (22.82% soit 21.28 km²), Oued El Aneb (5.27% soit 9.99 km²), Seraïdi (0.69% soit 0.94 km²) et Chetaïbi (0.69% soit 0.91 km²).

D'une autre part, l'augmentation des sols artificialisés et des sols nus estimée au niveau de la bande littorale de 3 km par rapport à celle estimée à l'échelle de la commune est de 77,53% (Annaba), de 41,54% (Chetaïbi), de 35,78% (Seraïdi), de 25,82 % (El Bouni) et de 0,45% (Oued El Aneb). Par conséquent, ces pourcentages élevés indiquent que les dispositions de la loi 02-02 n'ont pas empêché les activités d'artificialisation des sols côtiers au niveau de la wilaya d'Annaba.

La recherche actuelle donne lieu à plusieurs orientations pour les travaux futurs. Parmi celles-ci, on peut citer :

- L'étendue temporelle de l'étude va inclure l'estimation des changements entre 1985 et 2000 en exploitant les archives Landsat 4-5 TM (1982-2012).
- L'utilisation de la classification supervisée pour produire des cartes d'occupation du sol. Les classes thématiques seront identifiées par la création d'un profil spectral pour les types d'occupation des sols à l'échelle de chaque commune. En outre, le profil spectral permettra à l'EBBI de distinguer entre les sols artificialisés et les sols nus.
- La réalisation de l'évaluation de la précision (*accuracy assessment*), qui est une composante importante de tout projet de classification. Elle compare l'image classée à une autre source de données qui est considérée comme précise ou aux données de réalité de terrain.
- L'amélioration des résultats de la classification de la cohérence interférométrique, par l'utilisation de 5 images de cohérence empilées au lieu d'une seule image comme données d'entrée pour le processus de la classification. Il faut noter que, chaque image de cohérence est estimée à partir d'une paire d'images InSAR.

Bibliographie

Bibliographie

AGENCE NATIONALE D'INTERMÉDIATION ET DE RÉGULATION FONCIÈRE (2013). *Monographie de la Wilaya d'Annaba*, 8 p.

AICHOURI, Imen, HANI, Azzedine, BOUGHERIRA, Nabil, DJABRI, Larbi, CHAFFAI, Hicham et LALLAHEM, Sami (2015). River flow model using artificial neural networks. *Energy Procedia*. Vol. 74, p.1007-1014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.832>

AL-DOSKI, Jwan, MANSOR, Shattri B. et SHAFRI, Helmi Zulhaidi Mohd (2013). Image Classification in Remote Sensing. *Journal of Environment and Earth Science*, vol. 3, no.10, p. 141-147.

ANSELME, Brice, et GADAL, Sébastien (2008). *EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection : Environnement terrestre : Les indices de végétation : Les principaux indices de végétation : Les indices simples* [en ligne]. Rennes, France : UVED Université de Rennes 1. Consulté le 11 novembre 2019. Disponible sur : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/qques-indices/indices-simples.html>

APLIN, Paul et ATKINSON, Peter M. (2004). Predicting Missing Field Boundaries to Increase Per-Field Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 70, no. 1, p. 141-149. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.1.141>

AS-SYAKUR, Abd. Rahman, ADNYANA, I Wayan Sandi, ARTHANA, I Wayan et NUARSA, I Wayan (2012). Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. *Remote Sensing*. Vol. 4, no. 10, p. 2957-2970. <https://doi.org/10.3390/rs4102957>

BAKKER, Wim H., FERINGA, Wim, GIESKE, Ambro S. M., GORTE, Ben G. H., GRABMAIER, Karl A., HECKER, Chris A., HORN, John A., HUURNEMAN, Gerrit C., JANSSEN, Lucas L. F., KERLE, Norman, VAN DER MEER, Freek D., PARODI, Gabriel N., POHL, Christine, REEVES, Colin V., VAN RUITENBEEK, Frank J., SCHETSELAAR, Ernst M., TEMPFLI, Klaus, WEIR, Michael J. C., WESTINGA, Eduard et WOLDAI, Tsehaie (2009). *Principles of remote sensing : an introductory textbook*. Enschede, Pays-Bas : The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). 591 p.

BAKKER, Wim H., GRABMAIER, Karl A., HUURNEMAN, Gerrit C., VAN DER MEER, Freek D., PRAKASH, Anupma, TEMPFLI, Klaus, GIESKE, Ambro S. M., HECKER, Chris A., JANSSEN, Lucas L. F., PARODI, Gabriel N., REEVES, Colin V., WEIR Michael J. C., GORTE, Ben G. H., HORN, John A., KERLE, Norman, POHL, Christine, VAN RUITENBEEK, Frank J. et WOLDAI, Tsehaie (2004). *Principles of remote sensing : an introductory textbook*. Enschede, Pays-Bas : The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). 250 p.

BREIMAN, Leo (2001). Random Forests. *Machine Learning*. Vol. 45, no. 1, p. 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

- BUTLER, Kevin (2013). Band Combinations for Landsat 8. In : *ArcGIS Blog* [en ligne]. Consulté le 11 novembre 2019. Disponible sur : <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/band-combinations-for-landsat-8/>
- CABY, Renaud, HAMMOR, Dalila et DELOR Claude P. (2001). Metamorphic evolution, partial melting and Miocene exhumation of lower crust in the Edough metamorphic core complex, west Mediterranean orogen, eastern Algeria. *Tectonophysics*. Vol. 342, no. 3–4, p. 239-273. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00166-4)
- CAMPBELL, James B. et WYNNE, Randolph H. (2011). *Introduction to remote sensing*. 5ème édition. New York, New York, États-Unis : The Guilford Press. 667 p.
- CANTY, Morton John (2014). *Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing : With Algorithms for ENVI/IDL and Python*. 3ème édition. Boca Raton, Florida, États-Unis : CRC Press. 576 p.
- ČERNÁ, Lenka et CHYTRÝ, Milan (2005). Supervised classification of plant communities with artificial neural networks. *Journal of Vegetation Science*. Vol. 16, no. 4, p. 407-414. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02380.x>
- CHÉRY, Philippe, LEE, Alexandre, COMMAGNAC, Loïc, THOMAS-CHERY, Anne-Laure, JALABERT, Stéphanie et SLAK Marie-Françoise (2014). Impact de l'artificialisation sur les ressources en sol et les milieux en France métropolitaine. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 668, [consulté le 12 décembre 2019]. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.26224>
- CONSEIL INTERNATIONAL DE LA LANGUE FRANÇAISE (1997). *Manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie : français-anglais*. Paris, France : Conseil international de la langue française, 1997. 448 p.
- CRESSON, Remi, et SAINT-GEOURS, Nathalie (2015). Natural Color Satellite Image Mosaicking Using Quadratic Programming in Decorrelated Color Space. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Vol. 8, no. 8, p. 4151-4162. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2449233>
- DE BLOMAC, Françoise, GAL, Rony, HUBERT, Manuel, RICHARD, Didier, et TOURRET, Christophe (1994). *Arc/Info, concepts et applications en géomatique*. Paris, France : Hermes Science Publications. 248 p.
- DO, Thanh-Nghi, LALLICH, Stéphane, PHAM, Nguyen-Khang, et LENCA, Philippe (2009). Un nouvel algorithme de forêts aléatoires d'arbres obliques particulièrement adapté à la classification de données en grandes dimensions. Conférence : Extraction et gestion des connaissances (EGC'2009), Actes, Strasbourg, 27 au 30 janvier 2009, p. 79-90. Volume : Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, RNTI-E-15.
- DOUMIT, Jean A.V., et SAKR, Samar C. (2015). La cartographie du sol nu dans la vallée de la Bekaa à partir de la télédétection. *Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS"*. Vol. 1, no. 21, p. 19-24. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-19-24>

- DRONOVA, Iryna, GONG, Peng et WANG, Lin (2011). Object-based analysis and change detection of major wetland cover types and their classification uncertainty during the low water period at Poyang Lake, China. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 115, no. 12, p.3220-3236. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.006>
- EMERY, William et CAMPS, Adriano (2017). *Introduction to satellite remote sensing : atmosphere, ocean, land and cryosphere applications*. 1ère édition. Amsterdam, Pays-Bas : Elsevier. 860 p.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2007). *ASAR Product Handbook*. No. 2.2. 564 p.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2013). *Sentinel-1 User Handbook*. No. 1, rev. 0. 80 p.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (2015). *Sentinel -2 User Handbook*. No. 1, rev. 2. 64 p.
- FOURNIER, Alexandre (2008). *Détection et classification de changements sur des scènes urbaines en télédétection*. Thèse de doctorat. Signal, image et optimisation. Toulouse, France : Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace. 130 p.
- GHODBANI, Tarik et BERRAHI-MIDOUN, Fatiha (2013). La littoralisation dans l'Ouest algérien : analyse multiscalaire des interactions hommes-espaces-écosystèmes. *Espace populations sociétés* [en ligne], no. 1-2, [consulté le 13 août 2019], pp. 231-243. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.4000/eps.5488>
- GHODBANI, Tariket SEMMOUD, Bouziane (2010). Urbanisation côtière en Algérie, Processus et impacts sur l'environnement : Le cas de la baie d'Aïn el Turck. *Études caribéennes* [en ligne], no. 15, [consulté le 10 août 2019]. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.4431>
- GIRI, Chandra P. (2012). *Remote sensing of land use and land cover: principles and applications*. 1ère édition. Boca Raton, Florida, États-Unis : CRC Press. 469 p.
- GOMEZ-CHOVA, Luis, ZURITA-MILLA, Raúl, ALONSO, Luis, AMOROS-LOPEZ, Julia, GUANTER, Luis et CAMPS-VALLS, Gustavo (2011). Gridding Artifacts on Medium-Resolution Satellite Image Time Series : MERIS Case Study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 49, no. 7, p. 2601-11. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2108660>
- GRIMES, Samir (2018). *Rapport National sur l'Etat et l'Avenir de l'Environnement en Algérie : Rapport d'expertise*. 47 p.
- HAKLAY, Mordechai et WEBER, Patrick (2008). OpenStreetMap : User-Generated Street Maps. *IEEE Pervasive Computing*. Vol. 7, no. 4, p. 12-18. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>
- HANNA, Sara (2019). *GSP 216 - Introduction to Remote Sensing : Learning Module 5.1 : Image Enhancements (Part II) : Spectral Enhancements*. Arcata, California : Humboldt State University. Consulté le 11 novembre 2019. Disponible sur : http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson5-1/index.html

- İLSEVER, Murat et ÜNSALAN, Cem (2012). *Two-Dimensional Change Detection Methods : Remote Sensing Applications*. 1ère édition. Londres, Royaume-Uni : Springer-Verlag. 77 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4255-3>
- JENSEN, John R. (2005). *Introductory digital image processing : a remote sensing perspective*. Prentice Hall series in geographic information science. 3ème édition. Upper Saddle River, New Jersey, États-Unis : Prentice Hall. 526 p.
- JENSEN, John, GUPTILL, Stephen et COWEN, David (2012). *Change Detection Technology Evaluation : A Report to the Geography Division, U.S. Census Bureau*. 240 p.
- KACEMI, Malika (2009). Protection du littoral en Algérie entre gestion et législation : Le cas du pôle industriel d'Arzew (Oran, Algérie). *Droit et société*. Vol. 73, no. 3, p. 687-701. <https://doi.org/10.3917/drs.073.0687>
- KACEMI, Malika (2011). Protection et valorisation du littoral en Algérie : législation et instruments : Le cas des communes littorales d'Oran. *Études caribéennes* [En ligne], no. 20, [consulté le 09 août 2019]. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.5959>
- KEUCHEL, Jens, NAUMAANN, Simone, HEILER Matthias, et SIEGMUND, Alexander (2003). Automatic Land Cover Analysis for Tenerife by Supervised Classification Using Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 8, no. 4, p. 530-41. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00130-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00130-5)
- LAOUAR, Dounia et MAZOUZ, Said (2017). La carte axiale, un outil d'analyse de l'accessibilité spatiale : cas de la ville d'Annaba. *Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie*. Vol. 35, p. 111-123.
- L3Harris Geospatial (sans date). *Spectral Indices*. In : *Site Web du L3Harris Geospatial* [en ligne]. Consulté le 3 août 2019. Disponible sur : <https://www.harrisgeospatial.com/docs/SpectralIndices.html>
- LUHEGA, Charles Simon (2002). *Urban Area Delineation Using InSAR Products*. Thèse de master. Geoinformatics. Enschede, Pays-Bas : International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC). 92 p.
- MA, Guanyu, QING, Zhao, QIANG, Wang, et MIN Liu (2018). On the Effects of InSAR Temporal Decorrelation and Its Implications for Land Cover Classification: The Case of the Ocean-Reclaimed Lands of the Shanghai Megacity. *Sensors*. Vol. 18, no. 9, p. 2939. <https://doi.org/10.3390/s18092939>
- MALDERA, Giuseppe (2016). *Change Detection con dati Sentinel-2 in ERDAS IMAGINE*. Ref. : PK01-528-608. Bari, Italia : Planetek Italia. 27 p.
- MAS, Jean-François (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 26, no. 4, p. 349-362. <https://doi.org/10.1080/07038992.2000.10874785>

- MELLOUK, Karima et AROUA, Najet (2015). Le lac Fetzara, une zone humide fragile, menacée par l'extension urbaine de la ville d'Annaba (littoral est algérien). *Méditerranée* [En ligne], no. 125, [consulté le 20 septembre 2019], p. 133-140. Disponible sur le web : <https://doi.org/10.4000/mediterranee.8077>
- MERCKELBAGH, Alain (2009). *Et si le littoral allait jusqu'a la mer : La politique du littoral sous la Ve république*. Versailles, France: Éditions Quæ. 352 p.
- MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT (2006). Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. 490 p.
- MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT ET DU TOURISME (2008). Le Littoral Etat et Perspective : Projet de Rapport. 164 p.
- MINISTÈRE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA VILLE (2013). Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières en Algérie, 259 p.
- MORICONI-EBRARD, François et DINARD, Frédéric (2000). L'urbanisation du littoral Méditerranéen. *Mappemonde*. Vol. 57, no. 1, p. 32-36.
- NASA and METI Science Teams (2019). NASA and METI Release ASTER Global DEM Version 3. In : *Site Web du LP DAAC* [en ligne]. Consulté le 03 novembre 2019. Disponible sur : <https://lpdaac.usgs.gov/news/nasa-and-meti-release-aster-global-dem-version-3/>
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (sans date). What is the difference between land cover and land use? In : *Site web du National Ocean Service* [en ligne], Consulté le 19 août 2019. Disponible sur : <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lclu.html>
- OFFICE NATIONAL DES STATISTIQUES (2011). *Armature Urbaine*. Collections Statistiques N° 163/2011 Série S : Statistiques Sociales. 220 p.
- OFFICE NATIONAL DES STATISTIQUES (2015). *Statistiques sur l'environnement*. Collections Statistiques n° 177/2015 Série C : Statistiques Régionales et Cartographie. 110 p.
- Copernicus Open Access Hub (sans date). In : *Site Web du Copernicus Open Access Hub* [en ligne]. Consulté le 28 juillet 2019. Disponible sur : <https://scihub.copernicus.eu/>
- OpenStreetMap Wiki contributors (2005). About OpenStreetMap. In : *OpenStreetMap Wiki* [en ligne]. Consulté le 08 novembre 2019. Disponible sur : https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=About_OpenStreetMap&oldid=2031307
- OpenStreetMap Wiki contributors (2009). GIS software. In : *OpenStreetMap Wiki* [en ligne]. Consulté le 08 novembre 2019. Disponible sur : https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=GIS_software&oldid=1979163
- RABEHI, Walid, GUERFI, Mokhtar et MAHI, Habib (2018). Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger. *Méditerranée* [en ligne], espaces urbains, [consulté le 12 décembre 2020]. Disponible sur le web : <http://journals.openedition.org/mediterranee/8625>

- RICHARDS, John A, et JIA, Xiuping (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis : An Introduction*. 4ème édition. Berlin et Heidelberg, Allemagne : Springer-Verlag. 464 p. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
- RICHARDS, John A. (2013). *Remote sensing digital image analysis: an introduction*. 5ème édition. Berlin et Heidelberg, Allemagne : Springer-Verlag. 513 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
- RODRIGO, Frédéric (2019). Représentation des modèles numériques de terrain sur le web : ombrage et 3D. In : *Makina Corpus Blog* [en ligne]. Consulté le 01 novembre 2019. Disponible sur : <https://makina-corpus.com/blog/metier/2019/modeles-numeriques-terrain-ombrage-3D>
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. et DEERING, D.W. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, Washington DC, 10-14 December 1973, p. 309-317.
- SAMRAOUI, Boudjéma, et ALFARHAN, A.H. (2015). Odonata in Streams on Mount Edough, Algeria, and in Kroumiria, Tunisia. *African Entomology*. Vol 23, no. 1, p. 172-79. <https://doi.org/10.4001/003.023.0129>
- SCHMIDT, Cindy, et MCCULLUM, Amber (2018). *Advanced Webinar : Change Detection for Land Cover Mapping*. Webinaire récupéré de NASA ARSET. Disponible sur : <https://arset.gsfc.nasa.gov/land/webinars/adv-change18>
- SEKERTEKIN, Aliihsan et MARANGOZ, Aycan Murat (2017). An Erdas Imagine Model To Extract Urban Indices Using Landsat 8 Satellite Imagery. *International Journal of Scientific & Technology Research*. Vol. 6, no. 01, p. 62-67.
- Serco Italia SPA (2018). *Urban Classification with Sentinel-1 – Case Study : Germany (version 1.2)*. Webinaire récupéré de RUS Lectures. Disponible sur : <https://rus-training.eu/training/urban-classification-with-sentinel-1>
- SINGH, Ashbindu (1989). Review Article Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 10, no. 6, p. 989-1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>.
- SOERGEL, Uwe (2010). *Radar remote sensing of urban areas*. 1ère édition. Dordrecht, Pays-Bas : Springer Netherlands. 294 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3751-0>
- TOU, Julius T. et GONZALEZ, Rafael C. (1974). *Pattern recognition principles*. Reading, Massachusetts, États-Unis : Addison-Wesley. 377 p.
- TUCKER, Compton J (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 8, no. 2, p. 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2016). Landsat—Earth observation satellites (ver. 1.1, August 2016) : U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081, 4 p., <http://dx.doi.org/10.3133/fs20153081>

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(2017). *Landsat Surface Reflectance-derived Spectral Indices Product Guide*. Version 3.6. 31 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(2018a).*Landsat 8 Surface Reflectance Code (LASRC) Product Guide*. Version 1.0. 40 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(2018b). *Landsat 7 (L7) Data Users Handbook*. Version 1.0. 154 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(2018c). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. Version 3.0. 115 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(2019).*Landsat 4-7 Surface Reflectance (LEDAPS) Product Guide*.Version 2.0. 38 p.

WENG, Qihao (2012). *An introduction to contemporary remote sensing*. 1ère édition. New York, New York, États-Unis : McGraw-Hill Education. 320 p.

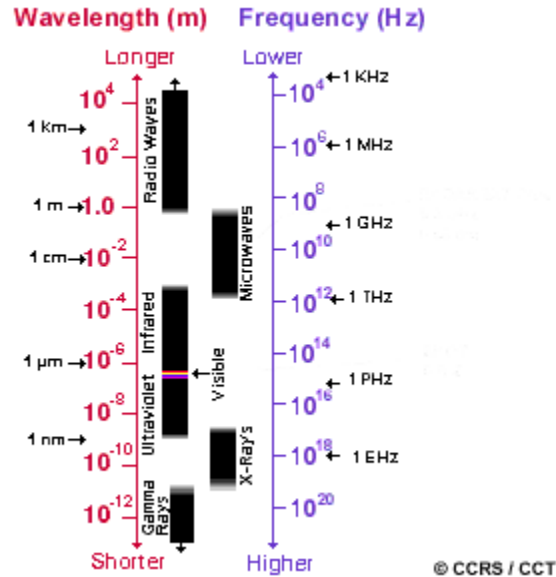
ZENNIR, Rabah, GUESSOUM, Djamel Eddine et COTE, Marc (2018). L'étalement urbain entre la ville d'Annaba et d'El Bouni : Mécanismes et mutations.*Revue urbanisme & construction*. Vol. 2, no. 6, p. 205-223. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/67733>

Annexes

Annexes

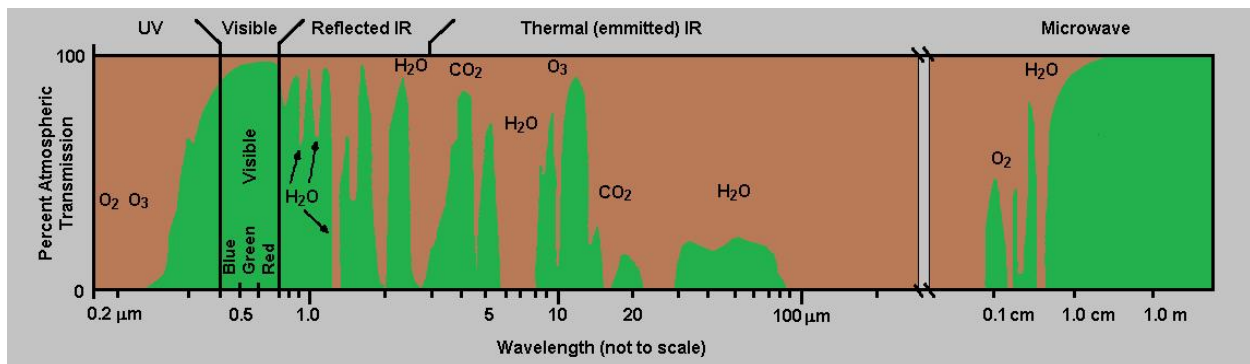
1. Spectre électromagnétique

(Source : Fundamentals of Remote Sensing, Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), URL : http://sar.kangwon.ac.kr/etc/fundam/chapter1/chapter1_3_e.html).



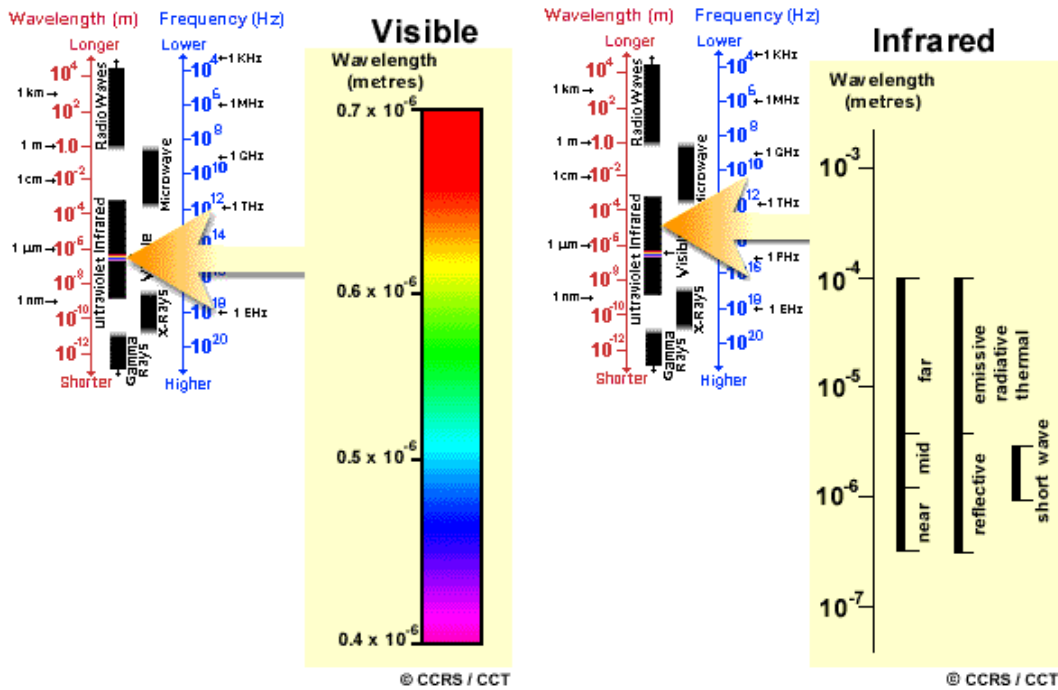
2. Fenêtres atmosphériques

(Source : Paul R. Baumann. Introduction to remote sensing, The State University of New York, URL : <http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/RS-Introduction/RS-Introduction.html>).

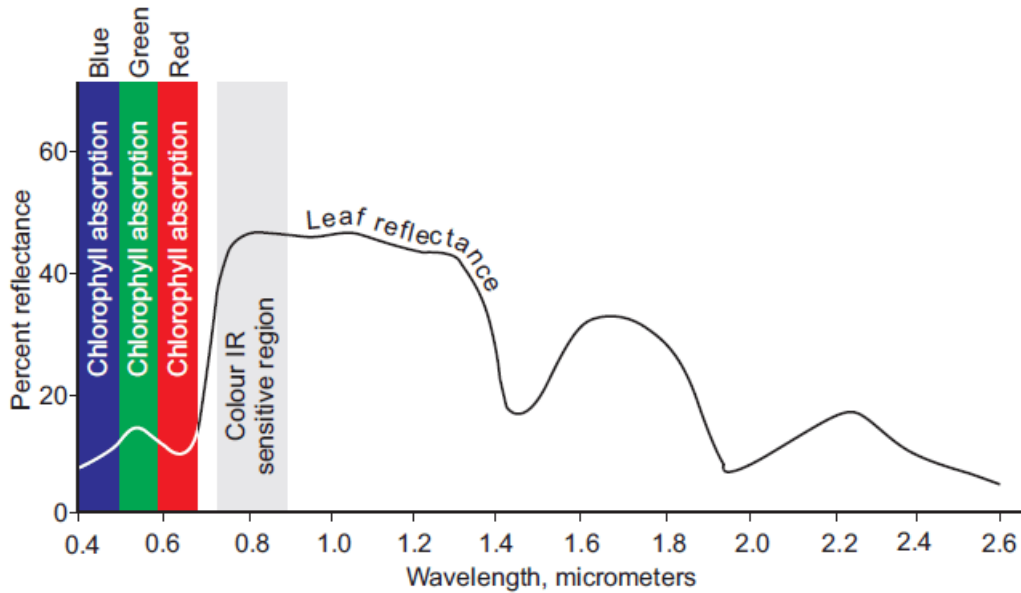


3. Régions visible et infrarouge du spectre électromagnétique.

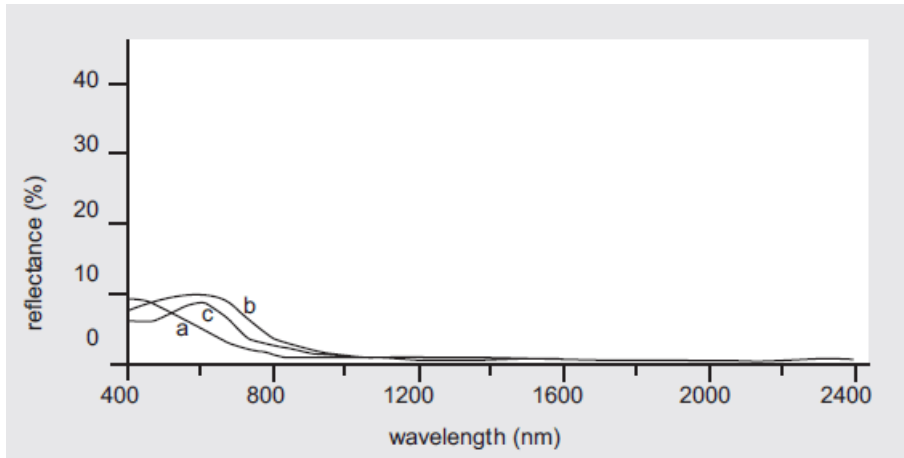
(Source : Canada Centre for Remote Sensing, CCRS).



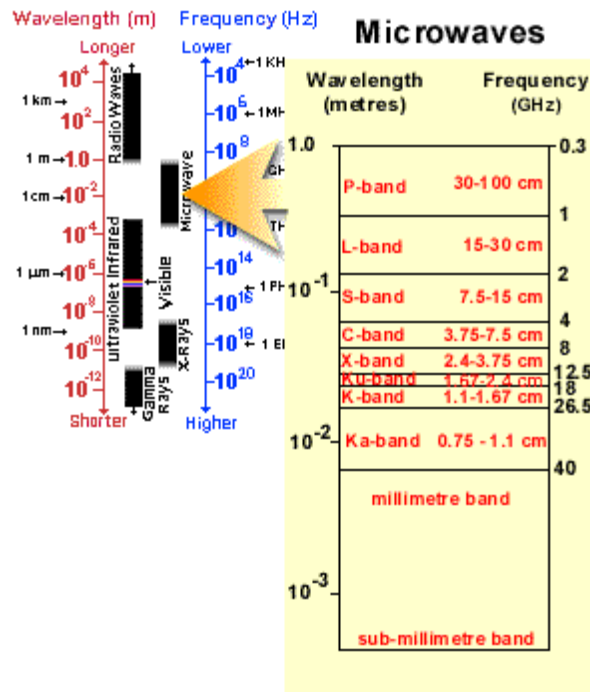
4. Courbe de réflectance spectrale typique d'une végétation saine.



5. Effets typiques de la chlorophylle et des sédiments sur la réflectance de l'eau: a) eau de mer, b) eau trouble, c) eau contenant de la chlorophylle.



6. Région hyperfréquence du spectre électromagnétique.
(Source : Canada Centre for Remote Sensing, CCRS).



© CCRS / CCT

7. Bandes spectrales du Landsat 7 ETM + (Source : USGS)

Band Name	Bandwidth (µm)	Resolution (m)
Band 1 Blue	0.45 - 0.52	30
Band 2 Green	0.52 - 0.60	30
Band 3 Red	0.63 - 0.69	30
Band 4 NIR	0.77 - 0.90	30
Band 5 SWIR 1	1.55 - 1.75	30
Band 6 Thermal (Low Gain / High Gain)	10.40 - 12.50	60 (Resampled to 30 m)
Band 7 SWIR 2	2.08 - 2.35	15
Band 9 Panchromatic	1.1. - 0.90	15

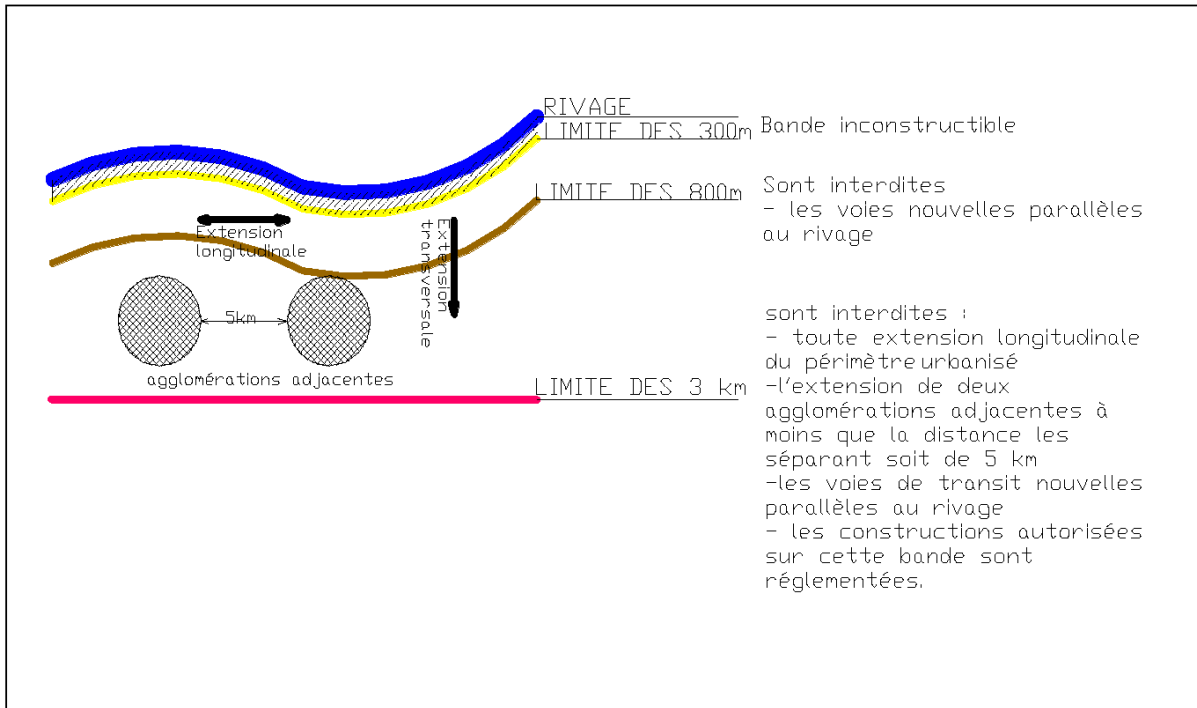
8. Bandes spectrales du Landsat 8 OLI/TIRS (Source : USGS)

Band Name	Bandwidth (µm)	Resolution (m)
Band 1 Coastal/Aerosol	0.433-0.453	30
Band 2 Blue	0.450-0.515	30
Band 3 Green	0.525-0.600	30
Band 4 Red	0.630-0.680	30
Band 5 NIR	0.845-0.885	30
Band 6 SWIR 1	1.560-1.660	30
Band 7 SWIR 2	2.100-2.300	30
Band 8 Panchromatic	0.500-0.680	15
Band 9 Cirrus	1.360-1.390	30
Band 10 TIRS 1	10.6-11.2	100 m (Resampled to 30 m)
Band 11 TIRS 2	11.5-12.5	100 m (Resampled to 30 m)

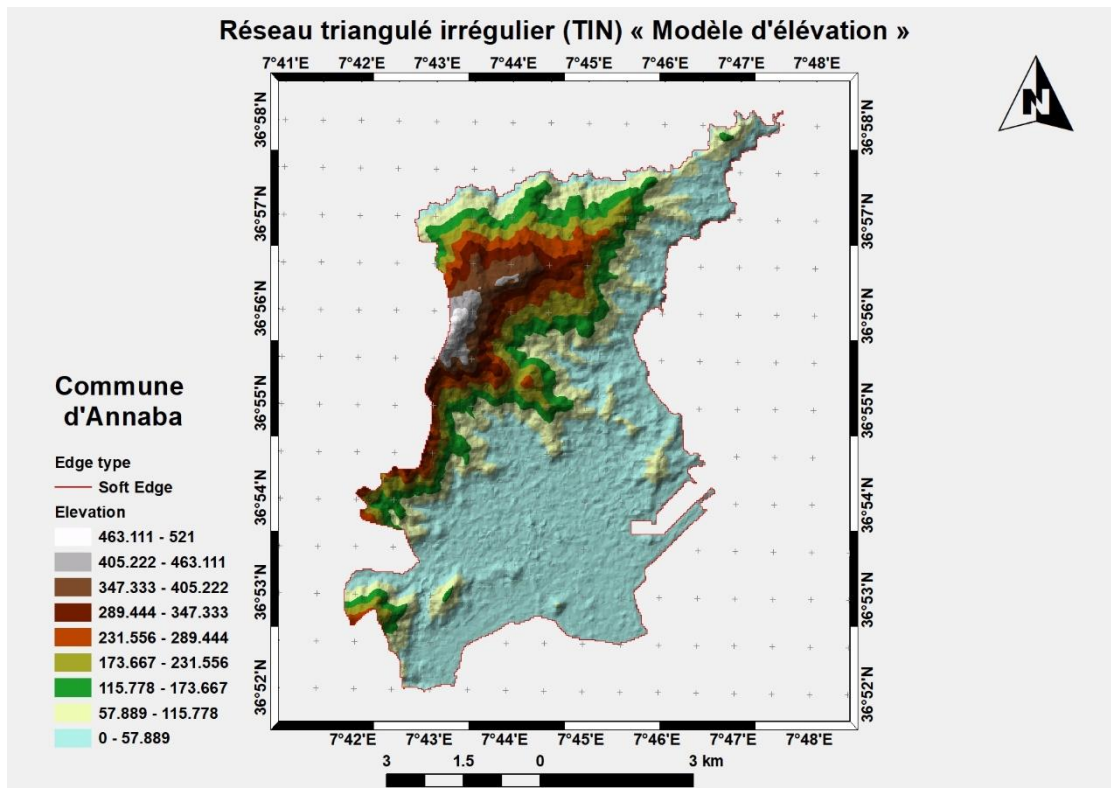
9. Bandes spectrales du Sentinel-2 MSI (source : ESA)

Sentinel-2 bands	Central wavelength (nm)		Spatial resolution (m)
	Sentinel-2A	Sentinel-2B	
Band 1 – Coastal aerosol	442.7	442.2	60
Band 2 – Blue	492.4	492.1	10
Band 3 – Green	559.8	559.0	10
Band 4 – Red	664.6	664.9	10
Band 5 – Vegetation red edge	704.1	703.8	20
Band 6 – Vegetation red edge	740.5	739.1	20
Band 7 – Vegetation red edge	782.8	779.7	20
Band 8 – NIR	832.8	832.9	10
Band 8A – Narrow NIR	864.7	864.0	20
Band 9 – Water vapour	945.1	943.2	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	1376.9	60
Band 11 – SWIR	1613.7	1610.4	20
Band 12 – SWIR	2202.4	2185.7	20

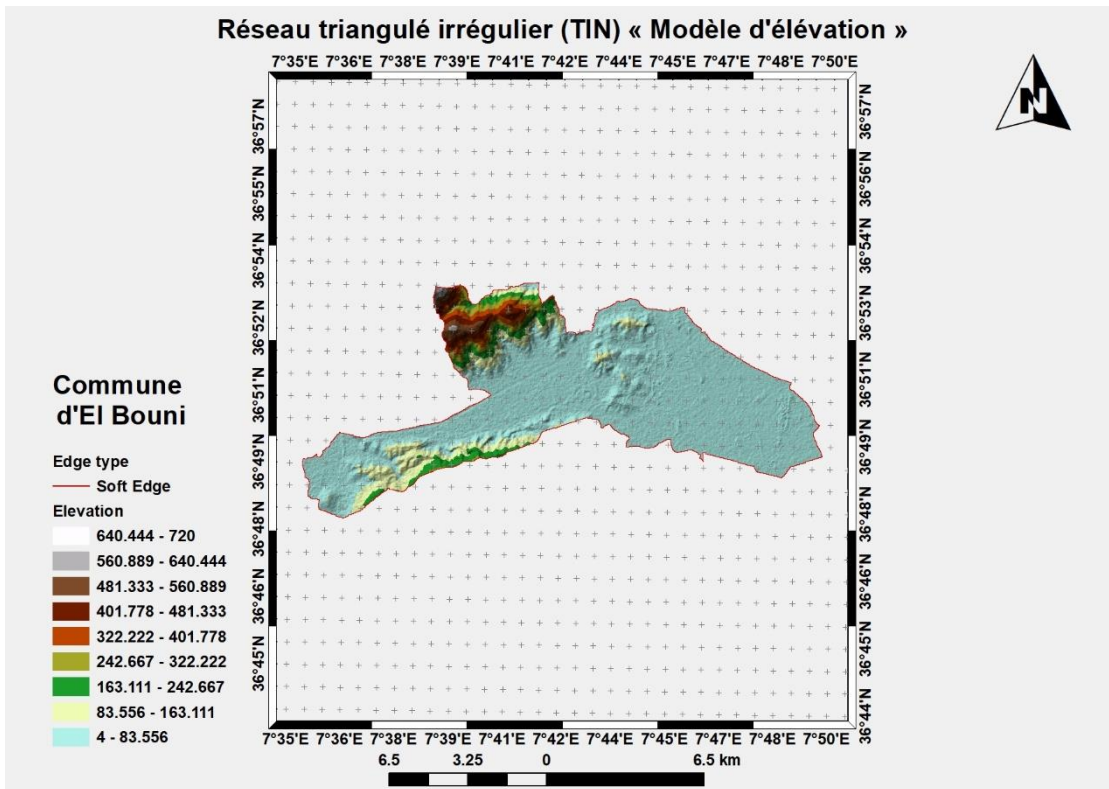
10. Bandes délimitées par la loi 02-02 du 05-02-2002.



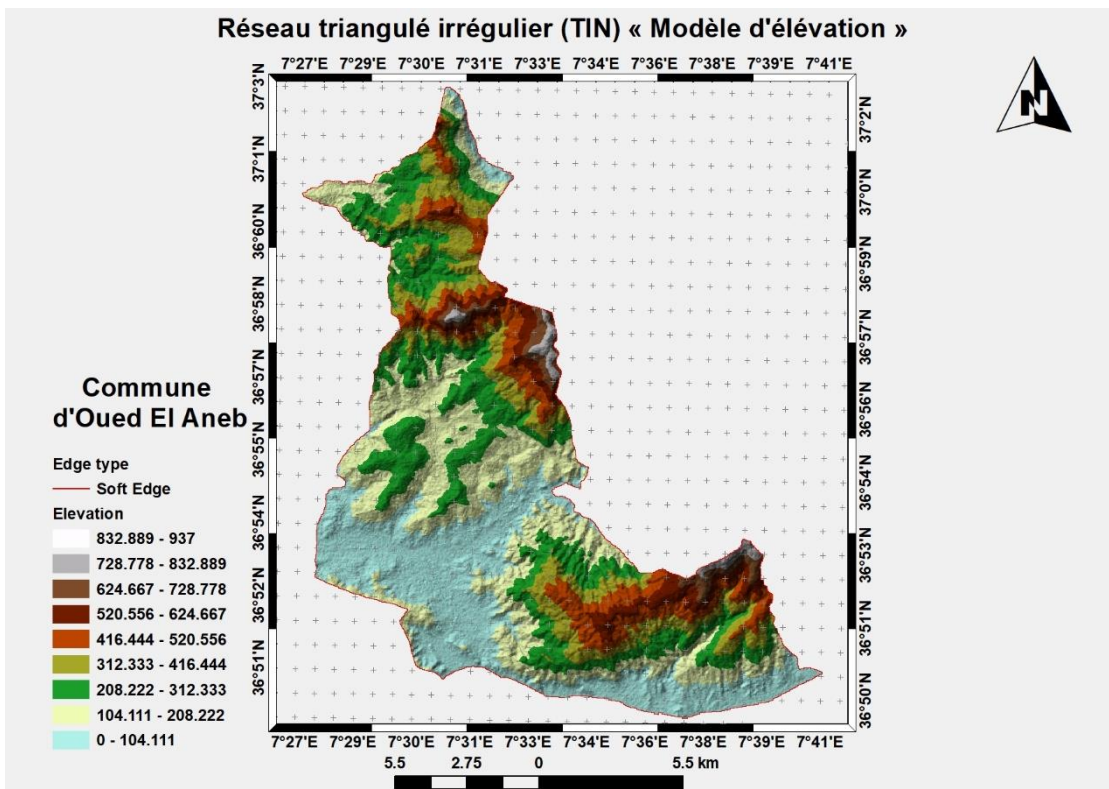
11. Représentation TIN en 3D de la topographie de la commune d'Annaba



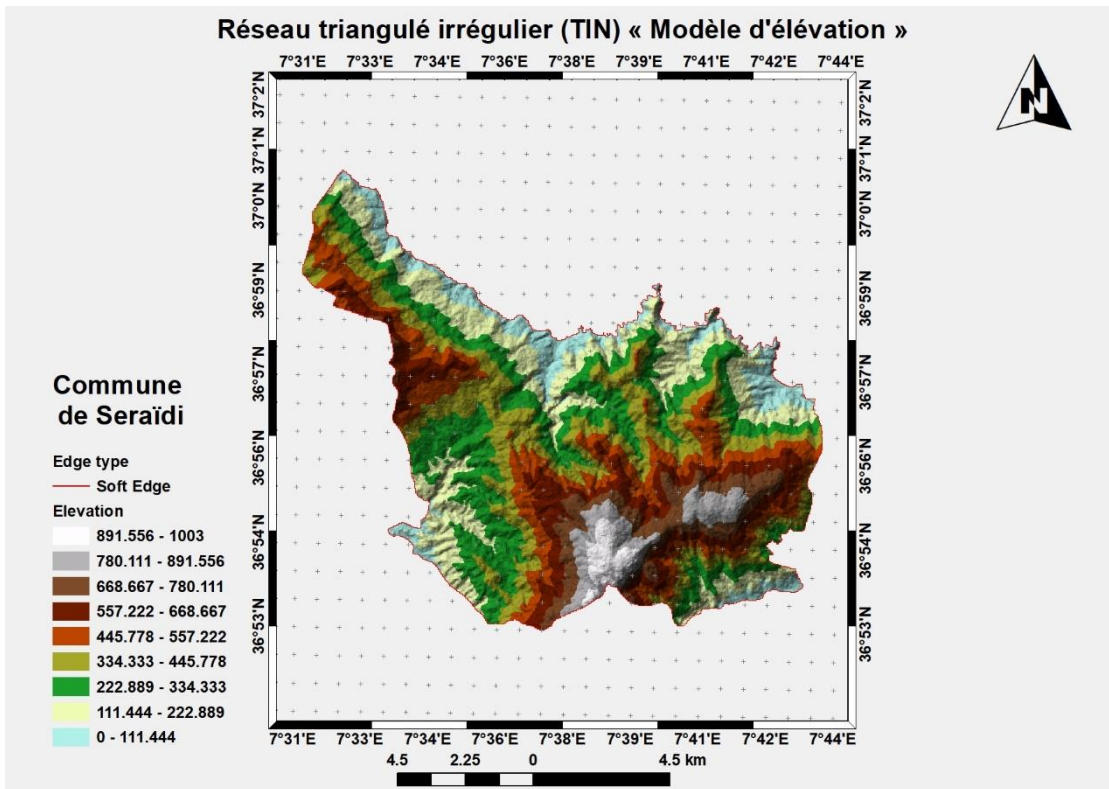
12. Représentation TIN en 3D de la topographie de la commune d'El Bouni



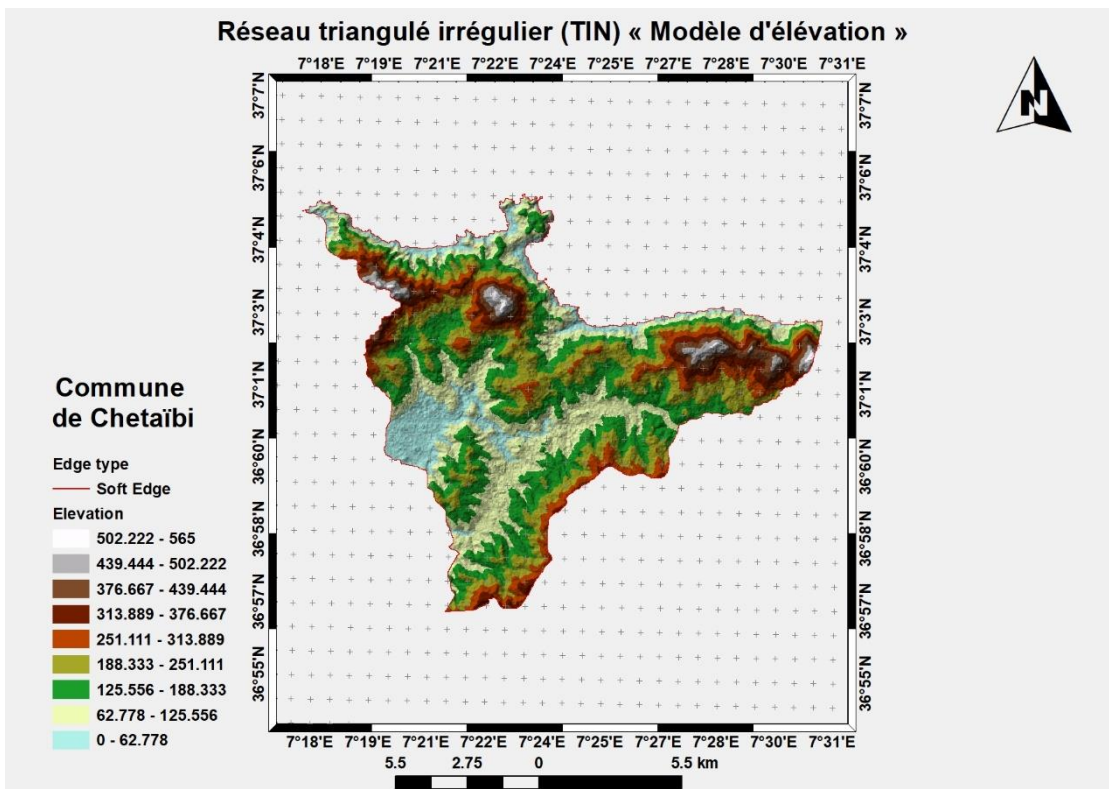
13. Représentation TIN en 3D de la topographie de la commune d'Oued El Aneb



14. Représentation TIN en 3D de la topographie de la commune de Seraïdi



15. Représentation TIN en 3D de la topographie de la commune de Chetaïbi



Résumé :

Le métropolisation des villes est un phénomène planétaire, qui affecte particulièrement des villes côtières et économiquement attractives (haliotropisme). A l'instar des grandes villes côtières algériennes, Annaba est touchée par une expansion urbaine intensive, marquée par une artificialisation des sols incontrôlée. Il est à signaler que ces emprises d'artificialisation se sont faites sur des zones agricoles et touristiques, par conséquent une consommation considérable de l'occupation du sol a été entraînée. Le but de ce travail est d'analyser l'artificialisation des sols sur les communes côtières d'Annaba à l'aide des techniques de la télédétection du changement en utilisant d'images satellites à moyenne résolution spatiale et à libre accès, en vue d'identifier et d'estimer (quantifier) les sols artificialisés entre 2000 et 2019. En outre, une cartographie récente des zones urbaines a été effectuée. L'accent est ensuite mis sur l'analyse qualitative et quantitative des résultats obtenus afin de parvenir à une conclusion et de donner des perspectives futures pour l'amélioration de l'étude actuelle.

Mots-clés: Artificialisation des sols, Télédétection du changement, Annaba, loi littorale, Algérie.

Abstract :

The metropolization of cities is a global phenomenon, which particularly affects coastal and economically attractive cities. As is the case with the major coastal cities of Algeria, Annaba is affected by an intensive urban expansion that is marked by an uncontrolled land artificialization. It should be pointed out, that these artificialization undertakings have been made over agricultural and touristic areas, therefore a considerable consumption of land cover has been caused. This study aims to analyze the artificialization of land at the level of the coastal communes (municipalities) of Annaba, by employing remote sensing change detection techniques using open access satellite images at medium spatial resolution, in order to identify and estimate (quantify) the artificialized lands between 2000 and 2019. In addition, a recent mapping of urban areas has been carried out. Emphasis is then placed on the qualitative and quantitative analysis of the obtained results, with a view to reach into a conclusion and to provide future perspectives for the improvement of the current study.

Keywords: Artificialization of land (or Land development), Remote sensing change detection, Annaba, Coastal law, Algeria.

ملخص :

توسيع المدن الحاضرة (او الكبرى) يعتبر ظاهرة عالمية تؤثر بشكل خاص على مدن ساحلية و ذات جاذبية اقتصادية، على غرار المدن الساحلية الجزائرية الكبرى تشهد عناية توسعا حضريا مكثفا يتميز بتطوير الأراضي الغير المنسق حيث تجدر الإشارة إلى أن مشاريع تطوير الأراضي المعنية قد تمت في مناطق زراعية وسياحية، مما أدى إلى حدوث استهلاك كبير للغطاء الأرضي.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تطوير الأراضي على مستوى البلديات الساحلية لولاية عنابة من خلال توظيف تقنيات الاستشعار عن بعد لمراقبة وكشف التغير باستخدام صور الأقمار الصناعية ذات الدقة المكانية المتوسطة و ذات الوصول الحر، من أجل تحديد وتقدير المساحات المطورة بين عامي 2000 و 2019، بالإضافة الى إنشاء خرائط حديثة للمناطق الحضرية و في الأخير تم التطرق إلى التحليل النوعي والكمي للنتائج التي تم الحصول عليها بهدف التوصل إلى استنتاج وتقديم آفاق مستقبلية لتحسين الدراسة الحالية.

كلمات مفتاحية : تطوير الأراضي، الاستشعار عن بعد لمراقبة وكشف التغير، ولاية عنابة، قانون حماية الساحل، الجزائر.