

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mustapha Stambouli de Mascara
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique, LRSBG Mascara



THÈSE

DE DOCTORAT LMD

Filière : Sciences de la Terre et de l'Univers

Option : Hydrogéologie, sol et environnement

Présentée par

Mr CHRAIR Mohammed

Thème

**Apport des SIG et la télédétection pour la gestion durable
du bassin versant de la Macta - Algérie -**

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

HAMIMED Abderrahmane	Professeur	Université de Mascara	Directeur de thèse
HAMADOUCHE Mohammed Amine	MCA	Université de Mascara	Co-Directeur de thèse
BENYOUCEF Madani	Professeur	Université de Mascara	Président du jury
BENSLIMANE Mohamed	Professeur	Université de Mascara	Examineur
SITAYEB Tayeb	Professeur	Université de Saida	Examineur
KHALDI Abdelkader	Professeur	Université de Mascara	Invité

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

En premier lieu, Je remercie chaleureusement mon ex-directeur de thèse, Khaldi Abdelkader, professeur des universités et ex-recteur de l'université de Mascara, et mon co-directeur, Dr Hamadouche Mohammed Amine, pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un sujet d'actualité et plein de potentiel ! Vos grandes complicités et complémentarités effectives ont rendu notre travail de thèse d'autant plus agréable et efficace. Je suis ravi d'avoir travaillé en votre compagnie. Merci pour tous le temps consacré à mon apprentissage de doctorant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame Christiane Weber, Professeur de Géographie et directrice de l'UMR pour les Territoires et l'Environnement par la Télédétection et l'Information Spatiale de Montpellier, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je voudrais remercier grandement Madame Flavie Cernesson de la confiance dont elle a fait preuve envers moi ainsi, de son suivi régulier, de sa compréhension et ses qualités humaines dont je suis très reconnaissant. Mes remerciements s'adressent à toute l'équipe AMOS, en particulier Aguejdad Rahim, Dino Lenco, Lucille Sautot, d'avoir participé à éclairer et orienter une grande partie de ce travail de recherche.

Il m'est impossible d'oublier monsieur Jean Pierre Laborde ! Je vous remercie pleinement pour votre accueil plus que chaleureux à domicile à Antibes ! Cette visite fut enrichissante à tous les niveaux ! Merci pour tous les savoirs transmis et pour votre apport considérable dans la partie dédiée à la modélisation du réseau hydrographique.

Cette thèse m'a également permis de vivre une expérience inoubliable en faisant partie du projet ERASMUS + MAGIC intitulé: HydroPlatform in Water and Environment to Enhance MAGhreb Inter-Research Centers, j'ai eu la chance de rencontrer Monsieur Hans van der Kwast, Maître de conférences en modélisation écohydrologique à "IHE Delft Institute for Water Education", je le remercie d'abord de m'avoir encouragé à surmonter la barrière de la langue en parlant avec les Dutch people ! et d'accepter de me révéler les secrets de la modélisation à l'aide du Framework PCRaster Python.

J'ai pu travailler dans d'excellentes conditions au laboratoire LRSBG, Je tenais à remercier plus spécialement son directeur monsieur Hamimed Abderrahmane, mon directeur de thèse actuellement, qui m'a fait partager ses brillantes intuitions et m'a permis de progresser en SIG. Outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

Merci à ma famille et mes proches qui m'ont rappelé qu'il n'y a pas que la géomatique dans la vie. Enfin, un immense merci à Papa qui m'a sans cesse soutenu et encouragé !

Résumé

La gestion durable d'un espace complexe, en l'occurrence un bassin versant, implique une connaissance approfondie de son évolution et de son fonctionnement spatio-temporelle. Les changements d'occupation des sols et les activités anthropiques, particulièrement l'étalement urbain, les interactions entre problèmes environnementaux et pratiques locales et la faible intégration entre les outils d'aménagement et les impératifs du développement durable, sont les majeurs indicateurs de pression qui ont un impact directe sur la terre, la ressource en eau et l'environnement locale du grand bassin de la Macta au Nord-Ouest de l'Algérie.

Les problèmes de décision à référence spatiale sont de nature multicritère et complexes, devant une dégradation qui continue d'affecter l'équilibre naturel du bassin, ce travail vise, d'une part, d'intégrer les données de télédétection dans un système d'information géographique et d'appliquer les outils de la géomatique pour le suivi spatio-temporel de l'étalement urbain par télédétection multi-source en appliquant une classification orientée objet sur des images satellitaires d'une bonne résolution spatiale, afin d'illustrer la progression du tissu urbain. D'autre part, Les données OLI_TIRS de Landsat 8 ont été adaptées pour l'extraction de la température de surface en appliquant l'algorithme du canal unique, dans la perspective d'identifier la relation entre le type d'occupation du sol et son impact sur le comportement thermique.

La modélisation du réseau hydrographique à partir d'un modèle numérique de terrain, en appliquant la méthode D8 avec schéma unidirectionnel, a permis de générer un plan de surface amont drainée dont on fixe un seuil pour extraire le réseau de drainage. L'extraction de plusieurs réseaux à différentes valeurs de seuil et les comparer à un réseau de référence à rendu possible la détection des zones où l'aménagement sur terrain était insuffisant pour drainer le volume d'eau ruisselé, ce qui a permet de détecter les zones inondables.

Mots clés: Système d'Information Géographique, Télédétection, Gestion Durable, Bassin Versant, la Macta.

Abstract

Sustainable management of a complex space as a watershed involves in-depth knowledge of its evolution and its spatio-temporal functioning. Changes in land use and human activities, particularly urban sprawl, interactions between environmental problems and local practices and the weak integration between planning tools and the requirements of sustainable development, are the major pressure indicators that have a direct impact on land, on water resources and the local environment of the large Macta watershed in northwestern Algeria.

Decision problems with spatial reference are complex and of multi-criteria nature, due to a degradation which continues to affect the natural balance of the watershed, this work aims, firstly to integrate remote sensing data into a geographic information system and apply geomatic tools for spatio-temporal monitoring of urban sprawl by multi-source remote sensing data, by applying an object-oriented classification on satellite images with high spatial resolution, in order to illustrate the progression of the urban sprawl.

On the other hand, Landsat 8 OLI_TIRS data has been adapted to extract land surface temperature by applying the single channel algorithm, in perspective to identify the relationship between land use type and its impact on thermal behavior.

Modeling the hydrographic network from digital elevation model, by applying the D8 method with unidirectional diagram, allowed to generate a drained upstream surface plan for which we set a threshold to extract drainage network. Extracting multiple networks with different threshold values and comparing them to a reference network, allowed detection of areas where land development was insufficient to drain the volume of runoff, which allowed to detect flood zones.

Keywords: Geographic Information System, Remote Sensing, Sustainable Management, Watershed, Macta.

ملخص

الإدارة المستدامة لمساحة معقدة، كالحوض الهيدرولوجي، يتطلب معرفة معمقة بتطوره وأدائه المكاني والزمني. التغييرات في استخدام الأراضي والأنشطة البشرية، إضافة الزحف العمراني، والتفاعلات بين المشاكل البيئية والممارسات المحلية وكذا ضعف التكامل بين أدوات التخطيط وضرورة التنمية المستدامة، كلها مؤشرات ضغط رئيسية لها تأثير مباشر على الأرض والموارد المائية والبيئة المحلية لحوض المقطع الكبير في شمال غرب الجزائر.

إن مشاكل اتخاذ القرار المكاني ذات معايير متعددة وطبيعة معقدة، أمام التدهور المستمر و المؤثر على التوازن الطبيعي للحوض، يهدف هذا العمل، من ناحية، إلى دمج بيانات الاستشعار عن بعد في نظم المعلومات الجغرافية وكذا تطبيق أدوات الجيوماتكس للمراقبة المكانية والزمنية للزحف العمراني عن طريق الاستشعار عن بعد متعدد المصادر، وذلك من خلال تطبيق التصنيف الموجه للأشياء على صور الأقمار الصناعية ذات الدقة المكانية الجيدة، من أجل توضيح تقدم النسيج العمراني.

من ناحية أخرى، تم تكيف بيانات لاندسات 8 OLI_TIRS لاستخراج درجة حرارة السطح من خلال تطبيق وازمية القناة الواحدة، من منظور تحديد العلاقة بين نوع استخدام الأرض و تأثيرها على السلوك الحراري.

كما سمحت نمذجة الشبكة الهيدروغرافية من نموذج التضاريس الرقمية، من خلال تطبيق وازمية D8 مع رسم بياني أحادي الاتجاه، من إنشاء مخطط التدفق السطحي للمياه مع تحديد عتبة لاستخراج شبكة الصرف. إن استخراج عدة شبكات بقيم حدية و عتبات مختلفة مع مقارنتها بشبكة مرجعية لتصريف المياه السطحية جعل من الممكن اكتشاف المناطق التي لم تكن فيها التنمية على الأرض كافية لتصريف حجم المياه الجارية، مما جعل من الممكن اكتشاف مناطق الفيضانات.

كلمات مفتاحية: نظم المعلومات الجغرافية، الإستشعار عن بعد، التنمية المستدامة، حوض مجمع مياه، مقطع.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé.....	ii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des acronymes	x
Introduction générale.....	1
Chapitre1: Gestion des ressources en eau : Enjeux et concepts.....	8
1.1 Introduction.....	7
1.2 Contexte bibliographique du changement climatique.....	7
1.2.1 Précipitation	10
1.2.2 Introduction à la gestion intégrée des ressources en eau	13
1.2.3 La scène internationale la vision mondiale de l'eau.....	13
1.3 Le plan d'action	16
1.3.1 Une nouvelle éthique de l'eau	17
1.3.2 La gestion par bassin	18
1.4 La gestion intégrée des ressources en eau.....	19
1.4.1 Objectifs de la gestion intégrée de l'eau.....	20
1.4.2 Approche à deux voies de la GIRE	22
1.4.3 Collaboration horizontale.....	23
1.4.4 Collaboration verticale	23
1.4.5 La politique nationale de l'eau en Algérie.....	24
1.4.6 Evolution des administrations de l'eau	24
1.4.7 Le Ministère des ressources en eau	26
1.5 Conclusion	30
2 Chapitre 2 : Apport possible des systèmes d'information géographique et de la Télédétection.	33
2.1 Introduction.....	34
2.2 Système d'information géographique.....	34
2.2.1 Principales étapes historiques.....	35
2.2.2 Définitions et concepts associés.....	36
2.2.3 Les composantes des SIG	38
2.2.4 Fonctions et domaines d'application	41
2.2.5 L'information géographique numérique.....	42
2.2.6 Modes de représentation de l'information géographique	42

2.2.7	Systèmes de référence de localisation	45
2.2.8	SIG en environnement.....	45
2.3	Téledétection.....	46
2.3.1	Définition	47
2.3.2	Spectre électromagnétique	48
2.3.3	Interactions rayonnement-cible	50
2.3.4	Images de Télédétection	52
2.4	Conclusion	62
3	Chapitre 3 : Présentation de la zone d'étude.....	32
3.1	Caractéristiques de la zone d'étude	63
3.1.1	Situation géographique	63
3.1.2	Relief et topographie du bassin versant.....	63
3.1.3	La géologie.....	64
3.1.4	Aspect climatologique	65
3.1.5	Évolution des régimes pluviométriques	65
3.1.6	La population	65
3.2	Géographie de la population dans l'Ouest Algérien.....	67
3.2.1	Promotion administrative et délibération du développement industriel.....	68
3.2.2	L'impact de l'insécurité et des conflits internes.....	68
3.2.3	Relance économique	69
3.2.4	Inégalités dans l'accès aux ressources	70
3.2.5	Les impacts sur les pratiques et la dégradation de l'environnement	70
3.3	Conclusion	71
4	Chapitre 4 : Suivi spatio-temporel de l'étalement urbain, estimation de la température de surface et caractérisation des îlots de chaleur urbains par télédétection.....	63
4.1	Introduction.....	73
4.2	Zone d'étude	75
4.3	Le suivi et la mesure de l'étalement urbain	76
4.3.1	Introduction.....	76
4.3.2	Conclusion	83
4.4	Investigation de la relation entre l'étalement urbain et l'artificialisation du sol, le couvert végétale et la température de surface	84
4.4.1	Introduction.....	84
4.4.2	Source de données	87
4.4.3	Calcul de température de surface	87

4.4.4	Conversion des données OLI/TIRS en radiance (luminance).....	88
4.4.5	Conversion des données TIRS en température de brillance	88
4.4.6	Prétraitement des données OLI	89
4.4.7	Calcul de NDVI	89
4.4.8	Calcul de l'émissivité	90
4.4.9	Calcul de NDBI	90
4.4.10	Résultat et discussion	91
4.5	Conclusion	101
5	Chapitre 5 : L'urbanisation et son rôle dans l'aggravation du risque d'inondation. Extraction du réseau hydrographique par photo interprétation et à partir des images radar SRTM, délimitation des zones inondables	73
5.1	Introduction.....	104
5.2	L'organisation cyclique de la gestion du risque d'inondation.....	105
5.2.1	Les composantes du risque	106
5.2.2	Les phases de gestion de risque d'inondation	108
5.2.3	Les outils de cartographie de l'aléa inondation	109
5.3	Modèle Numérique de Terrain.....	112
5.3.1	Importance des MNT et multiplicité de leurs utilisations	114
5.3.2	Modélisation hydrologique	115
5.3.3	Utilité de la télédétection en hydrologie.....	116
5.3.4	Méthodologie de modélisation du réseau hydrographique à partir du MNT.....	117
5.3.5	Réseau hydrographique de référence.....	123
5.3.6	Délimitation des zones inondables	124
5.4	Conclusion	127
	Conclusion générale et perspectives.....	129

Liste des figures

Figure 1.1. Evolution des températures moyennes mondiales sur mer et sur terre, par hémisphères depuis 1880	8
Figure 1.2. Les 10 années les plus chaudes depuis 1880 par rapport à la normale 1901-2000	8
Figure 1.3. Vision thématique de la gestion intégrée (Pouget et al. 2003) avec A : Aménagement ; G : Gestion ; M : Milieu ; U : Usages	22
Figure 1.4. l'approche à deux voies de la GIRE (Philip et al.2008)	23
Figure 1.5. Organigramme du ministère des ressources en eau.	26
Figure 2.1. Les composantes d'un SIG (d'après ESRI, 2000)	38
Figure 2.2. Structure d'une base de données géographique.....	40
Figure 2.3. Modes de représentation de l'information géographique	43
Figure 2.4. Lien dynamique entre l'objet géométriques et son attribut	44
Figure 2.5. Le processus de télédétection selon [Bul 2008]	48
Figure 2.6. Signatures spectrales des objets (Agence spatiale canadienne)	49
Figure 2.7. Modes d'interaction rayonnement-cible (Agence spatiale canadienne).....	50
Figure 2.8. Interaction feuilles-rayonnement (Agence spatiale canadienne).....	51
Figure 2.9. Interaction eau-rayonnement (Agence spatiale canadienne)	51
Figure 2.10. Signatures spectrales pour la végétation, l'eau et les roches (Agence spatiale canadienne).....	52
Figure 2.11. Exemple de déficience d'une ligne nécessitant une correction sur image (Agence spatiale canadienne).....	55
Figure 2.12. Exemple de correction géométrique d'une image (Agence spatiale canadienne).....	55
Figure 2.13. Application d'un rehaussement linéaire (Agence spatiale canadienne).....	56
Figure 2.14. (a) Composition colorée Infrarouge 'fausses couleurs' réalisée à partir des bandes NIR Red Green, (b) 'vraies couleurs' Red Green Blue	57
Figure 2.15. Composition colorée réalisée à partir des bandes moyenne infrarouge, proche infrarouge et rouge.	58
Figure 3.1. Localisation géographique du bassin versant de la Macta (Mohamed Meddi et al, 2009)	63
Figure 3.2. Topographie du bassin versant de la Macta.	64
Figure 3.3. Carte Géologique des bassins versants Macta – Tafna (source : Khaldi, 2005).....	64
Figure 3.4. La répartition spatiale de la densité de population par commune en 2008 (Source : Ghodbani. T et al, 2013)	67
Figure 4.1. Formes de l'étalement urbain (source : Galster et al., 2001. Batty et al., 2003 in Rahim aguejdad, 2009).....	74
Figure 4.2. Les aires urbaines, (<i>Atelier d'HG Sempai, 2012</i>)	75
Figure 4.3. La zone d'étude (a) Sous-bassins versants de la Macta, (b) Sous-bassin versant d'Oued Fekan	76
Figure 4.4. Extrait de l'étalement urbain au centre de la plaine de Ghriss.	78
Figure 4.5. Extraction du tissu urbain sous ECognition.....	80
Figure 4.6. La plaine de Ghriss sous influence urbaine.....	81
Figure 4.7. Digitalisation du tissu urbain. Terrain urbanisé de 2008 à 2018 (rouge).....	81
Figure 4.8. Evolution de l'étalement urbain de 2008 à 2018.....	82
Figure 4.9. Organigramme d'extraction de la température de surface à partir des données Landsat 8.	91

Figure 4.10. Représentation de l'évolution temporelle des moyennes de la Ts, NDVI et NDBI.....	92
Figure 4.11. Distribution spatiale de la Ts durant quatre saisons en degrés Celsius (C°).	93
Figure 4.12. Interprétation visuelle de la distribution de la Ts en utilisant "Reference Maplink"	94
Figure 4.13. Distribution spatiale de NDVI durant quatre saisons.....	95
Figure 4.14. Distribution spatiale de NDBI durant quatre saisons.....	95
Figure 4.15. Etude de corrélation entre NDVI (axes x) et NDBI (axes y) pour quatre saisons.	96
Figure 4.16. Relation entre la Ts et le NDVI (Lambin et Ehrlich, 1996).....	96
Figure 4.17. Etude de corrélation entre Ts (axes x) et NDVI (axes y) pour quatre saisons.....	97
Figure 4.18. Etude de corrélation entre Ts (axes x) et NDBI (axes y) pour quatre saisons.	98
Figure 4.19. Diagramme de corrélation entre NDVI (axes x) et la moyenne de la Ts (axes y).....	99
Figure 4.20. Diagramme de corrélation entre NDBI (axes x) et la moyenne de la Ts (axes y).....	100
Figure 4.21. La corrélation entre NDBI, NDVI et Ts à partir de profils vertical et horizontal.....	101
Figure 5.1. Relief de la zone d'étude représenté par MNT de type SRTM.	118
Figure 5.2. Une cuvette à remplir dans le MNT	119
Figure 5.3. Un pic à enlever du MNT.....	120
Figure 5.4. Fonctionnement de l'outil Direction de flux selon la méthode D8.....	121
Figure 5.5. Carte de direction de flux.....	121
Figure 5.6. Fonctionnement de l'outil Accumulation de flux.....	122
Figure 5.7. Réseau hydrographique généré par plusieurs seuils	122
Figure 5.8. (a) Réseau hydrographique référentiel (b) Réseau hydrographique SRTM.....	123
Figure 5.9. zone teste trois rivière	124
Figure 5.10. zone teste montagne de Nesmoth.....	124
Figure 5.11. L'hôpital de Ghriss envahi par les eaux pluviales. (Janvier 2017)	125
Figure 5.12. Délimitation des zones à risque d'inondation (montagne de Nesmoth)	126
Figure 5.13. Délimitation des zones à risque d'inondation (Sud de Tighenif)	127

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Evolution temporelle et missions des administrations nationale de l'eau	24
Tableau 1.2 : Les missions des différents directions du ministère des ressources en eau	26
Tableau 1.3: Les bassins hydrographiques de l'Algérie.....	29
Tableau 2.1: Comparaisons détaillées entre le mode Vecteur et Raster.....	44
Tableau 2.2 : Résolution spatiale des satellites les plus courants.....	53
Tableau 3.1 : Répartition de la population dans l'Ouest par entités physiques (Sources : ONS, RGPH.)	66
Tableau 4.1 : Les métadonnées des images satellitaires utilisées.	87
Tableau 4.2 : Constante de conversion thermique à partir des valeurs des métadonnées K1 et K2. ..	88
Tableau 4.3 : Données statistiques saisonnières de la Ts, NDVI et NDBI.....	92
Tableau 5.1 : La relation entre la superficie drainée et la densité du réseau hydrographique.	123

Liste des acronymes

OLI	Operational Land Imager
TIRS	Thermal Infrared Sensor
Ts	Température De Surface
NDVI	Indice De Végétation Par Différence Normalisée
NDBI	Indice De Bâtis Par Différence Normalisé
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SNAT	Schéma National d'Aménagement Du Territoire
SRAT	Schémas Régionaux d'Aménagement Du Territoire
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental Sur l'Evolution Du Climat
NCDC	National Climatic Data Center
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MAGICC	Model for the Assessment of GHG Induced Climate Change
ANRH	Agence Nationale des Ressources en Eau
Cv	Coefficients De Variations
ENSO	El Niño/Southern Oscillation
NAO	North Atlantic Oscillation
METRIC	Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
TIM	Trapezoid Interpolation Model
ETM	Enhanced Thematic Mapper
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
GWP	Global Water Partnership
CME	Conseil Mondial de l'Eau
RIOB	Réseau international des organismes de bassin
SIE	Secrétariat international De l'Eau
WSSCC	Conseil De Concertation Pour L'approvisionnement En Eau Et L'assainissement
OIEau	Office International De L'eau
IWRM	Integrated Water Resources Management
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
MRE	Ministère Des Ressources En Eau
ANBT	Agence Nationale Des Barrages Et Transferts
ONID	Office Nationale De L'irrigation Et De Drainage
AGIRE	Agence Nationale De Gestion Intégrée Des Ressources En Eau
ONS	Office National Des Statistiques

AEE	Agence Européenne Pour L'environnement
THRS	Très Haute Résolution Spatiale
AVHR	Advanced Very High Resolution
EOS	Earth Observation System
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
ACP	Analyse En Composantes Principales
SW	Split-Window
MW	Mono-Window
TR	Transfert Radiatif
TOA	Top Of Atmosphere
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MIR	Moyen Infrarouge
PIR	Proche Infrarouge
SBV	Sous Bassin Versant
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MNE	Modèle Numérique d'Elévation
MNS	Modèle Numérique de Surface
GPS	Global Positioning System
TIN	Triangulated Irregular Network
ESRI	Environmental Systems Research Institute
Grass	Geographic Resource Analysis Support System
SIRS	Systèmes d'Information à Référence Spatiale
SIE	Systèmes d'Information sur l'Environnement
BDG	bases de données géographiques
BDRS	bases de données à référence spatiale
BIG	base d'information géographique structurée
DAO	dessin assisté par ordinateur
CAO	conception assistée par ordinateur
UTM	projection universelle de Mercator
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
PSN	Programme Spatial National

Introduction générale

Le développement durable est reconnu comme l'un des préoccupations majeurs à l'échelle internationale, en plus du changement climatique, de la préservation et de la protection de l'environnement. La plupart des sujets de préoccupation recouvrent ou convergent vers la gestion des ressources en eau. De fait, la tendance actuelle est de considérer que les réponses au changement climatique font partie intégrante de la prise de décision sur la gestion durable des ressources en eau. Ces réponses doivent être intégrées dans toute planification nationale du développement économique, social et régional, et harmonisées avec d'autres activités de gestion des ressources et de l'environnement, tant en pratique qu'au niveau de la prise de décision.

En Algérie, il est admis que des mesures sont nécessaires pour améliorer la capacité à s'adapter à la variabilité hydrologique et aux phénomènes extrêmes observés aujourd'hui dans des circonstances dynamiques, particulièrement les pressions dues à la démographie, à l'économie, à l'utilisation des terres et au développement régional, de même que pour réduire les vulnérabilités significatives de la société, de l'économie et de l'environnement aux impacts futurs.

Les enjeux fonciers et la question de l'eau, les inégalités d'accès aux ressources et les conflits d'usages (Ghodbani, 2013), les interactions entre problèmes environnementaux et pratiques locales et la faible intégration entre les outils d'aménagement et les impératifs du développement durable, sont les majeurs indicateurs de pression qui ont un impact direct sur la terre, la ressource en eau et l'environnement locale du grand bassin de la Macta. Les contraintes physiques et agricoles autour des agglomérations du bassin, couplées à la forte demande sur les terrains à urbaniser expliquent la forte concurrence sur le foncier.

Mascara et Sidi Bel Abbes, les deux plus importantes agglomérations reflètent cet état de fait. Leur étalement est dynamisé, à la fois, par un solde migratoire positif et une mobilité résidentielle du centre à la périphérie. À cette dynamique, s'ajoute un autre élément non moins important, celui de la réalisation récente de grands projets à rayonnement national, tel les pôles universitaires, etc. Le lancement de ces nouvelles réalisations, exigeantes en matière de superficie, répond à une volonté d'aménagement du territoire. La demande de nouvelles surfaces à urbaniser est amplifiée par la diminution des surfaces urbanisables proches de ces agglomérations, qui sont des terrains à vocation agricole.

À cette pression sur le foncier s'ajoute une demande de plus en plus croissante pour l'eau. Cette ressource ne peut être réduite à un simple aspect d'insuffisance des réserves disponibles. Dans les zones semi arides du sud de la méditerranée, la faiblesse des précipitations et leurs distributions aléatoires se traduisent souvent par une situation de contrainte hydrique (Amara, 2006). Les indications internationales concernant le changement climatique, mettent en évidence le besoin de

travailler à l'échelle régionale et de mettre l'accent sur la dimension spatiale des tendances trouvées. Ces recommandations sont notamment nécessaires dans les milieux méditerranéens, où les incertitudes sur le comportement futur des précipitations restent importantes.

L'accroissement de la demande en eau dans toute la région Nord est engendré par l'expansion urbaine et le développement économique, la situation dans la partie Ouest est particulièrement inquiétante. Le contexte physique, par rapport aux influences climatiques nord-ouest, dû aux basses altitudes, et la position géographique entre les chaînes montagneuses du sud espagnole et du Rif marocain, font que la partie occidentale de l'Algérie est la plus aride, en comparaison avec la partie centre et est. Cette situation s'est aggravée, durant ces dernières décennies, avec des périodes de sécheresse devenues de plus en plus longues.

Le recours à l'eau souterraine destinée à l'irrigation, et la carence dans l'alimentation en eau potable a engendré un rabattement du niveau piézométrique de la majorité des nappes exploitées, suite au pompage excessif. La faiblesse des ressources hydriques a poussé les gestionnaires à opter pour le dessalement industriel de l'eau de mer pour subvenir aux besoins des villes. Malgré les coûts élevés de ce procédé et les risques relatifs à l'artificialisation de la côte et de la pollution par le rejet des saumures dans la mer (Chouikhi, 2010), le dessalement apparaît comme un choix inévitable.

Les pressions sur les ressources en eau sont également qualitatives. La non généralisation des systèmes d'épuration des eaux usées dans toutes les agglomérations du grand bassin, particulièrement celles implantés au centre des plaines, par conséquent, les rejets non épurés d'eaux usées urbaines dans la mer sans traitement préalables d'une part, et l'infiltration de ces eaux dans les nappes phréatiques d'autre part, constitue une véritable menace pour l'équilibre des écosystèmes et la santé des habitants.

Les problèmes décisionnels à référence spatiale se rapportent généralement à des systèmes hétérogènes où interagissent différents facteurs. La maîtrise de la complexité de ces problèmes nécessite l'utilisation de méthodes, de techniques et d'outils d'analyse puissants, qui doivent non seulement gérer mais aussi analyser des données à référence spatiale d'origine et de nature diverses. Le traitement de l'information géographique de base ou thématique devient plus convivial grâce à la géomatique. Les techniques informatiques permettent d'analyser l'évolution spatio-temporelle des données. Ces systèmes d'information géo-décisionnel vient ainsi appuyer le processus de décision et pave la voie à une gestion plus éclairée.

Un Système d'Information Géographique (SIG) peut être utilisé pour effectuer des mesures, de tester différentes hypothèses théoriques, et de développer également des modèles utiles dont le but est de trouver de nouvelles ressources basée sur l'analyse statistique en relation avec les données environnementales et culturelles.

Les sources de données sont géométriquement liées à une base géographique commune dans un système numérique, ce qui rend plus facile le potentiel de l'extraction de l'information. D'ailleurs ceci définit le principe de l'analyse numérique dans un système d'information géographique. Dans ce type de système, toutes les données qui peuvent être géo-localisé dans un système de coordonnées géographiques, en plus des données attributaires classiques, sont susceptibles d'être utilisées. La télédétection intégrée avec les fonctionnalités des SIG joue un rôle majeur dans le développement et la gestion des problèmes territoriaux en fournissant des informations sur la couverture du sol et sa productivité (Betbeder, 2015), l'utilisation des terres et la qualité de la ressource hydrique.

Devant une dégradation qui continue d'affecter l'équilibre naturel du bassin de la Macta, et avec le développement de télédétection et des SIG régulièrement utilisés dans les études de géographie, d'écologie et de gestion des espaces dans divers domaines, ce travail vise d'intégrer les données de télédétection dans un système d'information géographique et d'appliquer les outils de la géomatique pour assurer une protection des terres, de l'eau et de l'environnement, qui ne peut être appréciée qu'à travers une gestion durable et une stratégie globale intégrant tous les acteurs aux différentes échelles du territoire.

Problématique scientifique

La problématique générale de cette thèse porte sur l'apport de la télédétection et les systèmes d'informations géographiques pour la gestion durable du bassin versant de la Macta, elle peut être décomposée en deux questions de recherche principales :

Le suivi spatio-temporel de l'étalement urbain et l'évaluation de son impact sur la température de surface : La progression de la consommation foncière, d'un taux annuel remarquable, continue d'intégrer de plus en plus d'espaces verts, cela se traduit par la disparition des hectares de terrains fertiles tous les quatre à cinq ans. Le changement dans l'utilisation et la couverture du sol, le mitage et le morcèlement croissant du territoire causé par urbanisation et artificialisation du sol modifie la température de surface.

L'urbanisation et son rôle dans l'aggravation du risque d'inondations : Le développement de l'urbanisation et son influence sur l'augmentation du risque d'inondation, l'anthropisation massive du bassin et modification des pratiques culturelles, mutation de l'usage des sols, sont à l'origine d'une augmentation des ruissellements. La périurbanisation, et l'étalement urbain exercé en plein centre des plaines, s'accompagne par extension du réseau routier, qui est souvent construit en surélévation par rapport aux terrains naturels qui les bordent, ou au contraire en tranchée, ce relief artificiel modifie considérablement le sens d'écoulement des eaux superficielles, et cause de graves résultats d'inondations.

Objectifs de la thèse

L'analyse et l'étude du phénomène d'étalement urbain par télédétection multi-source afin d'illustrer la progression du tissu urbain.

Application des techniques de la télédétection thermique (TIR) pour l'extraction de la température de surface (Ts) à partir des images Landsat 8 OLI-TIRS.

Investigation de la relation entre la Ts et l'indice de bâti par différence normalisé (NDBI), et entre la Ts et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dans la perspective de déterminer des indicateurs pour l'étude de phénomène des îlots de chaleurs urbains.

Extraction du réseau hydrographique par photo-interprétation et à partir des images radar SRTM à différents seuils, détection et cartographie du risque d'inondation.

Structuration de la thèse

Ce travail, composé de cinq chapitres, sera particulièrement axé sur les approches suivantes :

Après une introduction générale, la problématique et les objectifs de recherche qui en découlent ont été présentés avant d'entamer le premier chapitre, qui permet d'introduire le contexte dans lequel les travaux de notre thèse se placent, ainsi que des notions de base relatives à la gestion des ressources en eau, aux enjeux et aux concepts, tout en démontrant comment la question de l'eau été traité sur la scène internationale jusqu'au arrivant à la politique nationale d'une gestion durable de l'eau à l'échelle des bassins versants.

Le deuxième chapitre résume les différents outils de la géomatique à savoir les Systèmes d'Information Géographique et la télédétection en plus de différents domaines d'application, particulièrement en changement d'utilisation et de couverture du sol et en hydrologie.

Le troisième chapitre se concentre quant à lui sur la présentation des différentes caractéristiques de la zone d'étude à savoir la géographie, la géologie, la topographie, le climat, etc. en terminant par introduire l'impact de la pression anthropique et l'exploitation des ressources du grand bassin versant de la Macta.

Il a été choisi de diviser le quatrième chapitre en deux parties, la première se concentre sur les travaux portant sur le suivi et la mesure de l'étalement urbain et l'extension des surfaces artificialisées au détriments des terres agricoles, tandis que la seconde partie portera sur l'investigation de la relation entre cet étalement et l'artificialisation du sol, le couvert végétale et la température de surface, après avoir démontré comment extraire cette dernière à partir des données de télédétection thermique

jusqu'à la validation de sa distribution spatiale et de sa relation avec le type d'occupation du sol. Cette deuxième partie s'intéresse spécifiquement aux résultats obtenus à l'aide des méthodes du diagramme de dispersion entre la Ts, l'NDVI et l'NDBI,

Enfin, le dernier chapitre se concentre quant à lui sur la caractérisation spatiale de l'aléa inondation par la modélisation du réseau hydrographique par photo interprétation et à partir des MNT, en plus de validation sur terrain. Ce travail appliqué dans le sous bassin versant d'Oued Fekan a permis en plus de la délimitation des zones inondables, d'étudier le comportement hydrologique du bv grâce à l'apport introduit par les outils des SIG et les données de la télédétection.

CHAPITRE I

Gestion des ressources en eau : Enjeux et concepts

1.1 Introduction

L'eau est une matière naturelle vitale, aucun être vivant ne peut s'en passer. Se situant dans les glaciers, les nappes souterraines et les cours d'eau, elle est exploitée depuis des millénaires dans des sources et des puits pour des usages domestiques, la pratique de l'agriculture et de l'élevage. Les activités industrielles, agricoles et anthropiques, ainsi que l'accroissement démographique ne font que s'accroître. La qualité de la ressource en eau et sa disponibilité est menacée grandement par le changement climatique, la pression démographique et le développement économique (Vorosmarty et al., 2000 ; Quentin Grafton et al., 2011). L'eau est le constituant inorganique prépondérant dans toute matière vivante, nécessaire pour tous les êtres vivants ainsi qu'au développement des sociétés humaines, elle représente le facteur essentiel dans le développement de notre civilisation (Abraham, 1991). Comme il participe à de nombreux usages domestiques, agricoles et industriels... Certains usages impact la ressource et compromettent le bon fonctionnement du milieu naturel (Ancil, 2008).

Cette ressource naturelle pourtant parmi les plus vulnérables dans plusieurs pays, particulièrement celles situées dans les régions arides ou semi-arides ou sa disponibilité pose des problèmes. (Sipes, 2010 ; Wescoat et al., 2003). La perspective d'une raréfaction des ressources en eau dans de nombreux pays ne peut-être ignorer, notre dépendance à l'eau ne fait que se renforcer au fil du temps. Il est nécessaire de savoir comment la conserver et l'utiliser de façon efficace, équitable et durable (Pegram et al., 2013 ; Laurent, 1996). Dans un monde marqué par une forte inégalité dans la distribution des ressources en eau, la rareté de cette ressource dans tel pays engendre la décroissance de son économie sur tous les domaines. En 2050, plus de 5,7 milliards d'êtres humains pourraient vivre dans des régions où l'eau manque au moins un mois par an. Voilà le constat alarmant qu'a fait l'ONU lors du 8ème forum international de l'eau qui s'est déroulé à Brasilia. Sur ce plan on comprend que tout doit être mis en œuvre pour faire face contre la pénurie d'eau, cette pénurie qui touche la moitié de l'humanité, n'est pas si simple à régler. Sa protection est complexe à gérer tant les problèmes sont divers et impliquent la prise en compte du fonctionnement du milieu physique, biophysique et anthropique. Pour répondre aux besoins d'une population en expansion et à l'augmentation de la demande, la ressource en eau doit être préservée et gérée par l'ensemble des acteurs qui l'utilisent (les agriculteurs, les citoyens, les industriels, etc.) à l'échelle du bassin versant. (Brun et Lasserre, 2012).

1.2 Contexte bibliographique du changement climatique

D'après le quatrième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), "le réchauffement du climat ne fait aucun doute et est désormais attesté par l'augmentation observée des températures moyennes de l'air et de l'océan, la fonte généralisée de la neige et de la glace et l'augmentation du niveau moyen de la mer". Ainsi, la température moyenne à la surface du globe a déjà augmenté de + 1,1°C depuis l'époque préindustrielle. La première conséquence attendue et constatée des émissions massives de gaz à effet de serre est la hausse des températures moyennes à

la surface du globe. Or, les relevés météo enregistrent des anomalies positives de températures qui se confirment d'années en années par rapport aux températures enregistrées depuis le milieu du 19^e siècle. A ce titre, les climatologues soulignent que les trente dernières années ont connu les températures les plus élevées de l'hémisphère Nord depuis plus de 14 siècles.

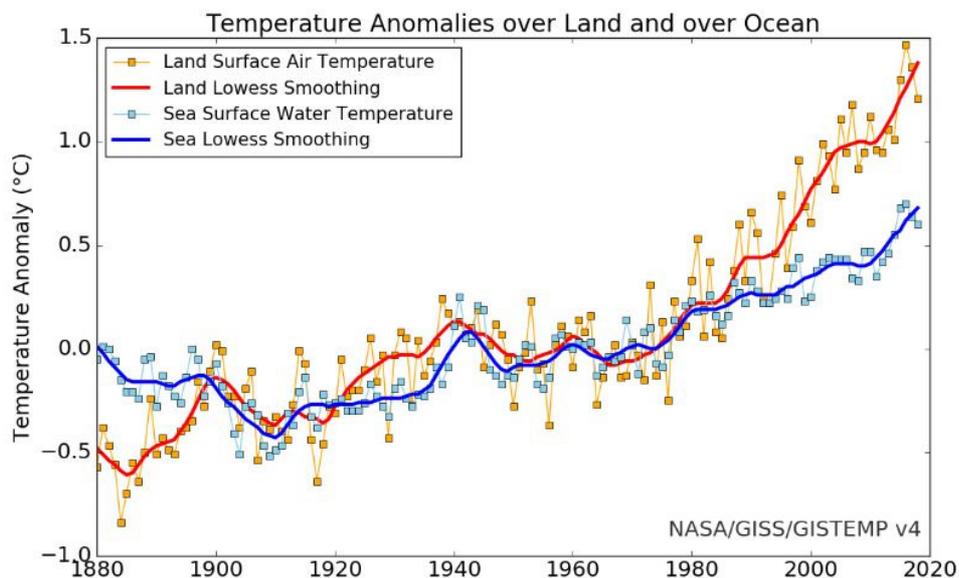


Figure 1.1. Evolution des températures moyennes mondiales sur mer et sur terre, par hémisphères depuis 1880.

Source : NASA GISS Surface Temperature Analysis

Le National Climatic Data Center (NCDC) des États-Unis dans son rapport sur l'anomalie des températures terrestres, a affirmé que les dix années les plus chaudes jamais enregistrées sont toutes postérieures à 1997. Pire, 14 des 15 années les plus chaudes se situent au 21^e siècle, à peine entamé. Ainsi, l'année 2016 est la plus chaude, suivie de près par 2015, 2014 et 2010.

Année	2016	2015	2017	2018	2014	2010	2013	2005	1998	2009
Anomalie de Température en °C	0.99	0.93	0.91	0.83	0.74	0.73	0.68	0.67	0.65	0.65

Figure 1.2. Les 10 années les plus chaudes depuis 1880 par rapport à la normale 1901-2000

Source : NCDC: Global Surface Temperature Anomalies

Ceci multiplie les phénomènes extrêmes et les anomalies climatiques, et aura des conséquences à l'échelle planétaire, à savoir une augmentation des fréquences d'apparition des inondations et des sécheresses. En effet, à l'échelle de l'humanité, une moyenne de 200 millions de personnes sont touchées chaque année par les catastrophes naturelles et environ 70 000 en périssent. Ce changement climatique affreux a un impact sur la hausse régionale importante des températures, la dégradation de la qualité des eaux douces et la décroissance de la production agricole. David EASTERLING et ses

collègues, du NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), dans leur article paru dans le journal Science, ont suggéré que divers événements climatiques exceptionnels deviennent de plus en plus nombreux. Ils confirment une tendance à l'intensification des catastrophes naturelles à l'échelle mondiale. Alors qu'il était enregistré moins de 50 événements significatifs par an sur la période 1970-1985, depuis 1995, le nombre a triplé.

Les effets du réchauffement, suivant les différents modèles climatiques, seront très divers et géographiquement inégaux. Bien que le réchauffement climatique global de la planète causé par l'accroissement de l'effet de serre devrait modifier les grands mécanismes climatiques tels les niveaux moyens de températures, les circulations océanique et atmosphérique et le cycle de l'eau, les contrastes régionaux sont présentés avec le réchauffement plus marqué dans l'hémisphère nord et des deux pôles planétaires. (Chaouche et al. 2010). En plus d'une augmentation, en fréquence et en intensité, des phénomènes météorologiques extrêmes (tempêtes, pluies torrentielles, incendies, sécheresses, etc.). D'autre part, l'ensemble de ce changement climatique aura probablement un impact profond sur les sociétés humaines, particulièrement dans le secteur économique, La production agricole et halieutique en sera affectée ainsi que les ressources en eau. Les tensions autour de l'accès à l'eau ou à la nourriture, des problèmes de santé publique, des risques de conflits. La sécurité des territoires et les infrastructures devraient, elles aussi, être affectées. On peut, particulièrement, donc s'interroger sur les conséquences de ce réchauffement sur le cycle de l'eau dans le Nord Algérien. En effet, la situation géographique de cette région, est probablement très sensible aux changements climatiques. Le climat régnant sur le pourtour de la Méditerranée, déterminé essentiellement par la latitude et la présence d'un volant thermique, est fortement influencé par le relief montagneux, là où celui-ci disparaît comme en Algérie, le climat subdésertique se fait sentir jusqu'à la mer. Ce climat établit une transition entre le régime climatique européen avec des climats tempérés, à hiver assez froid et été assez humide, et le régime climatique africain, désertiques très chaud et sec au Sud, ou tropicaux à été humide et hiver sec. Cette zone est caractérisée par des pluies d'hiver, des sécheresses estivales et des orages marqués au début d'automne et à la fin du printemps. Il est prévu, notamment, des vagues de chaleur et des canicules plus fréquentes et plus intenses que par le passé. La fréquence et l'intensité des sécheresses, la tendance à la réduction des précipitations implique une diminution de la recharge naturelle des eaux souterraines.

Ces changements climatiques s'accompagnent par un changement dans les valeurs moyennes des variables du cycle de l'eau, et aussi par un accroissement de leur variabilité dans le temps. (Jentsch, Kreyling, and Beierkuhnlein 2007). Le changement le plus probable correspond cependant à une intensification des contrastes hydrologiques, avec des risques accrus d'inondations en hiver et de sécheresses en été. Il importe donc de préciser la nature de ces risques, et d'étudier leurs conséquences sur l'hydrosystème local, cours d'eau et systèmes aquifères, qui définissent la ressource en eau, sous son double aspect de la quantité et de la qualité. En plus du climat, Les processus hydrologiques dans

les bassins sont influencés par ses caractéristiques physiques, et des activités anthropiques (Zhang et al. 2011). Bordiers de la Méditerranée et du désert le plus chaud du monde, l'Algérie ne bénéficie du climat méditerranéen subhumide que sur une étroite frange littorale alors que la plus grande partie de son territoire est exposé aux climats semi-aride et aride. Cette situation influe sur les précipitations qui sont marquées par leurs fortes variabilités spatio-temporelles, les ressources hydriques et le système hydraulique sont sensibles à cette variabilité climatique. Par ailleurs, la pénurie d'eau s'intensifie sous l'effet de la poussée démographique, de l'urbanisation accélérée et du développement économique, notamment dans le domaine agricole.

1.2.1 Précipitation

L'Algérie a connu au cours des trois dernières décennies, une sécheresse intense et persistante caractérisée par un déficit pluviométrique important. Cette sécheresse a touché l'ensemble du territoire et à sévit particulièrement dans les régions nord-ouest du pays (Ould Amara, 2000). Le modèle MAGICC (Hulme et al. 2001), centré sur cette région, estime en effet un réchauffement de l'ordre de 1°C entre 2000 et 2020 et une perturbation des régimes pluviométriques avec une tendance à la baisse, de l'ordre de 5 à 10 %. (Arrus and Rousset 2007) lors de leur étude sur l'agriculture du Maghreb au défit du changement climatique, ont estimé qu'à plus long terme, la température pourrait augmenter de 3°C aux environs 2050 et dépasser les 5°C en 2100, alors que les précipitations diminueraient de 10 à 30 % d'ici 2050 et de 20 à près de 50 % en 2100.

L'influence négative du climat sur la ressource en eau s'est ressentie sur les cours d'eau au Nord-Ouest de l'Algérie (bassin versant de la Macta). Une tendance évolutive vers l'aridification du climat sur le nord algérien en général et dans le bassin de la Macta précisément, notée par les résultats des tests statistiques, a conduit à un déficit d'écoulement entraînant une diminution des écoulements de surface et des niveaux des nappes souterraines. (Khaldi 2005; Laborde 1995). Les précipitations en Algérie sont irrégulières dans le temps et dans l'espace. Ces pluies sont croissantes de l'ouest vers l'est, contraste naturel, les zones susceptibles de bénéficier des précipitations se trouvent à l'ouest. En étudiant des données de 120 postes pluviométriques, Laborde (1995), a mis en évidence une étude rétrospective de la pluviométrie sur le Nord de l'Algérie:

1. Une longue phase humide durant laquelle la pluviométrie est supérieure à la moyenne, de 6%, de 1922 à 1938.
2. Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'Ouest et au Centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11%.
3. Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972.
4. Une longue phase sèche qui débute fin 1973.

(Laborde 1995) a également élaboré en collaboration avec l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH), une cartographie de la pluviométrie du nord algérien, où ils ont constatés que le changement

climatique s'est fait sentir sur le Nord-ouest de l'Algérie particulièrement dans les bassins de la Macta, du Cheliff et de la Tafna, dans le sens où la pluviométrie a fortement diminuée sur cette région. Sur la période 1930-2002, les précipitations annuelles ont enregistré une baisse de l'ordre de 40 % en moyenne après la rupture de la stationnarité des chroniques pluviométriques. (Mohamed Meddi, Talia, and Martin 2009). La comparaison des cartes pluviométriques à travers différentes périodes à savoir : 1913 à 1963, 1922 à 1989 et 1975 à 2000 dévoilent la disparition des isohyètes 400 mm. Les valeurs des coefficients de variations (Cv) des apports interannuels pour la période 1975 à 2000, sont relativement élevées ce qui indique un régime irrégulier. Les débits spécifiques moyens annuels présentent une augmentation générale du Sud vers le Nord sur l'Ouest du pays (0,46 à 0,811/s.km²). La période d'étiage pour la plupart des cours d'eau est comprise entre mai et septembre. Sur le plan de l'hydraulicité, ces cours d'eau se caractérisent par un écoulement violent et rapide. Les coefficients de tarissements sont forts (0,63 à 0,7) (Khaldi 2005). Une analyse de la variabilité temporelle des précipitations annuelles enregistrées au niveau de cinq stations des bassins de la Macta et de la Tafna situés dans le Nord-Ouest de l'Algérie été menée en utilisant les indices climatiques sur la période 1950-2004. Des tests de régression linéaire et le test de Pettitt ont révélé une baisse significative des précipitations annuelles dans le milieu des années 1970 dans les deux bassins. En outre, une diminution d'au moins 20% du total annuel des précipitations a été également observée dans les cinq stations. La diminution de la pluviométrie a dépassé 36 % dans la région de Mascara. Quant à l'analyse de corrélation canonique entre la variabilité des précipitations annuelles et les indices climatiques, au cours des cinq stations, les précipitations sont corrélées négativement avec El Niño/Southern Oscillation (ENSO) et dans une moindre mesure, avec le North Atlantic Oscillation (NAO) (M. M. Meddi, Assani, and Meddi 2010).

L'analyse de la température de la station d'Oran basée sur des données journalières, entre 1926 et 2006, montre une augmentation de plus de 2°C de la température suivie d'une baisse des précipitations de 15%, une occurrence accrue des sécheresses d'une année sur trois était constaté dès 1973. (Tabet et MAHI, 2008) dans leur étude sur l'impact du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb ont constaté que les changements climatiques, inédits au cours de l'histoire récente, vont impactés principalement les ressources en eau. La baisse des écoulements superficiels et la fréquence de plus en plus grande des périodes de sécheresse vont conduire à la baisse de la mobilisation des eaux de surface. Parmi les impacts il a été déduit une surexploitation des nappes phréatiques due à la pression anthropique. L'économie des pays du Maghreb va fortement être touché, la forte évapotranspiration due à l'augmentation des températures, accélère la dégradation des sols (salinité et érosions hydrique/éolienne), et perturbe la croissance normale des cultures. Suite à la sécheresse qui a touché toute l'Algérie du Nord, la baisse de la ressource a affecté les nappes phréatiques, les agriculteurs de la région ont eu recours à la mobilisation intense des ressources en eau souterraine par le biais de forage (M. Meddi et al. 2009). Les eaux souterraines impactées, notamment

par une diminution de la recharge par les précipitations. Une étude publiée dans le journal *scientifique Nature* montre que la capacité des nappes phréatiques à se reconstituer est totalement dépassée par le rythme des prélèvements, dont 70 % vont à l'agriculture. À l'échelle mondiale, environ 40 % des aliments que nous cultivons sont arrosés d'eau provenant de captages souterrains. Des études, d'impacts des changements climatiques sur la recharge des nappes, faites sur l'hydrogéologie de cette zone ont permis l'identification d'une exploitation intense des nappes d'eau souterraine qui s'est traduit par un niveau piézométrique plus bas que son niveau initial.

Dans la littérature, des études ont abordé la tendance des principaux paramètres hydro-climatiques, en plus des précipitations et des écoulements, le sujet de l'estimation de la température de surface et de l'évapotranspiration a fait l'objet de plusieurs recherches basant sur les données de télédétection et des systèmes d'information géographique, appliqué sur le bassin de la Macta qui, à son tour, joue un grand rôle dans la gestion des ressources en eau de la région et même dans le système hydraulique national, puisqu'il comprend trois grandes métropoles, à savoir la wilaya de Mascara, de Sidi Belabbés, et Saïda. L'évapotranspiration est une variable clé du cycle hydrologique, elle conditionne l'humidité des sols, facteur régulant le partage des précipitations entre infiltration et ruissellement ainsi que la recharge des eaux souterraines. C'est une composante majeure du bilan hydrologique, elle exprime les échanges de masse et d'énergie entre le système sol-eau-végétation et l'atmosphère. Un nombre important de variables contrôle ce processus incluant les deux rayonnements solaires et atmosphériques, le vent, l'humidité, la température, la couverture végétale et l'eau disponible. En plus de ces facteurs de contrôle, cette variable serait également dépendante de phénomènes climatiques de grande échelle (Douville et al., 2013; Miralles et al., 2014). Annoncé dans le 5ème rapport du GIEC, à partir de la méthode par bilan hydrologique, des travaux récents confirment la tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration réelle depuis les années 1980. Elle aurait augmenté à l'échelle mondiale de +1.51 mm/an sur la période 1982-2009 (Zeng et al, 2014). Pour l'estimer dans un agro-système semi-aride situé dans le bassin versant de la Macta, (Hamimed, 2015) a appliqué deux modèles de spatialisation METRIC (Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) et TIM (Trapezoid Interpolation Model), et les données des satellites Landsat-7 ETM+ et MODIS ainsi que des mesures agro-météorologiques de terrain. Il ressort que la tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration était bien marquée. La connaissance précise de ce paramètre est indispensable dans plusieurs applications environnementales, telles que la climatologie, l'hydrologie et l'agronomie. Le contexte probable de diminution des précipitations estivales dans le versant de la Macta et d'augmentation d'évapotranspiration tend à augmenter l'aridité, diminuer l'humidité des sols et diminuer la pluie efficace (part des précipitations qui ruisselle ou recharge les nappes). Par conséquent, le secteur agricole premier impacté, tous ces phénomènes impacteront les cultures, qu'elles soient irriguées ou non. Devant la gravité de cette situation qui intervient à une période où les besoins en eau se sont considérablement accrus, les gestionnaires et les planificateurs des ressources

en eau sont interpellés et s'interrogent sur l'ampleur et l'extension du phénomène, ses causes et ses conséquences et les stratégies à mettre en œuvre pour atténuer ses effets.

1.2.2 Introduction à la gestion intégrée des ressources en eau

Depuis toujours, l'eau a été un sujet d'intérêt prioritaire au plan politique tant national qu'internationale. Le sujet de l'eau est abordé lors des conférences intergouvernementales, des manifestations internationales de la société civile, des déclarations, des conventions et des autres traités sur l'eau. Face à une augmentation exponentielle des besoins par rapport à des ressources mobilisables relativement limitées d'une part, et à la pollution grandissante de ces ressources qu'elles soient souterraines ou superficielles, aux conflits d'usage à l'intérieur des pays ou entre pays partageant un même bassin d'autre part, s'impose l'idée de la nécessité d'une nouvelle politique mondiale de l'eau. L'eau est devenue un sujet central lors de forums internationaux, vu le caractère vital et transversal de sa gestion. Il est nécessaire de savoir comment gérer, exploiter et utiliser efficacement la ressource en eau pour les besoins de la société, de l'agriculture, et aussi pour le développement économique de l'industrie, tout en préservant la biodiversité, l'intégrité des écosystèmes naturels et en améliorant les conditions de vie de l'être humain. (UNESCO, 2002 ; LEMA, 2006 ; SDAGE BAG, 2010). Promouvoir et assurer une gestion intégrée et durable des ressources en eau, à différentes échelles, est primordiale partout pour face à ces contraintes, en prenant au sérieux du caractère spécifique de l'eau en tant qu'une source de vie et un bien patrimonial.

Toutefois, sous les pressions combinées de la demande continue de l'eau et de la détérioration incessante de sa qualité, les modèles classiques de gestion ne suffisent plus à la tâche. Il ne faut pas compter seulement sur la technologie, il faut désormais repenser en profondeur les approches qui permettront de maintenir la qualité des systèmes naturels en plus de satisfaction de nos besoins en eau. Donc il faudra apprendre à mieux gérer l'utilisation des ressources en eau selon de nouveaux paradigmes. Une gestion durable des ressources en eau qui concilie à la fois les besoins de l'être humain et ceux de la nature abordée d'une manière plus intégrée au lieu de le faire par secteurs d'activité, le passage progressif des modèles de gestion centralisée vers une participation accrue des collectivités.

1.2.3 La scène internationale la vision mondiale de l'eau

La communauté internationale intéressée à la question de l'eau a été très active depuis trentaines d'années avec une attention particulière à la gestion intégrée des ressources en eau. Il s'agit d'un changement profond, largement discutés à l'échelle internationale et qui semblent maintenant faire consensus entre les différents acteurs, du moins en termes théoriques. Avant d'aborder le sujet de la gestion par bassin comme telle, il nous est apparu de bien cadrer la question de l'eau et son évolution dans le temps, et ce lors de certains événements internationaux récents. Réellement, plus récemment, le débat sur l'eau est passé de la gestion de l'offre à une approche plus intégrée, de la technique axée

sur l'évaluation des ressources disponibles et sa répartition entre les usages dominants, à une nouvelle stratégie impliquant un large éventail de domaines, dont des aspects socio-économiques et politiques. En matière de développement durable, la reconnaissance de la valeur de l'eau sous ses multiples facettes est certainement un des événements marquants de la fin du 20^e siècle. L'évolution des idées en termes de gestion des ressources en eau est marquée par plusieurs événements internationaux. Depuis 1977, la conférence de Mar del Plata propose l'organisation d'une décennie de l'eau lors du lancement du débat sur les enjeux de l'eau. Puis, lors de la conférence internationale sur l'eau et l'environnement, réunie à Dublin (Irlande) du 26 au 31 janvier 1992, un certain nombre de principes déterminants sont adoptés par la communauté internationale en matière d'utilisation durable des ressources en eau, la déclaration finale de la conférence proposait et recommandait alors un certain nombre de mesures concertées s'inspirant de quatre grands principes:

- L'eau est une ressource limitée et vulnérable qui est indispensable à la vie, au développement et à l'environnement. La bonne gestion des ressources exige une approche globale qui concilie le développement socio-économique et la protection des écosystèmes naturels. Une gestion efficace intégrera l'utilisation du sol et de l'eau pour la totalité d'un bassin versant.
- La mise en valeur et la gestion de l'eau doivent avoir un caractère participatif et associer les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs à tous les niveaux. Pour ce faire, il faut que les décideurs, comme l'ensemble de la population, soient conscients de l'importance de la ressource en eau. Les décisions seraient donc prises à l'échelon compétent le plus bas en accord avec l'opinion publique et en associant les usagers à la planification et à l'exécution des projets relatifs à l'eau.
- Les femmes jouent un rôle déterminant dans l'approvisionnement, la gestion et la préservation de l'eau. L'adoption et l'application du principe d'une gestion globale exigent que l'on s'intéresse aux besoins particuliers des femmes et qu'on leur donne les moyens et le pouvoir de participer, à tous les niveaux, aux programmes conduits dans le domaine de l'eau, y compris la prise de décisions et la mise en œuvre, selon les modalités qu'elles définiront elles-mêmes. Les arrangements institutionnels relatifs à la mise en valeur et à la gestion des ressources en eau tiennent rarement compte du rôle primordial des femmes comme utilisatrices d'eau et gardiennes du milieu vivant.
- L'eau est utilisée à de multiples fins et a une valeur économique, et l'on doit donc la reconnaître comme un bien économique. En vertu de ce principe il est primordial de reconnaître le droit fondamental de l'homme à une eau salubre et une hygiène adéquate pour un prix abordable. La valeur économique de l'eau a été longtemps méconnue, ce qui a conduit à gaspiller la ressource et à l'exploiter au mépris de l'environnement. Considérer l'eau comme un bien économique et la gérer en conséquence, c'est ouvrir la voie à sa préservation et à sa protection en l'utilisant efficacement et en la répartissant équitablement.

La question de l'eau a été traitée en détail au Sommet de la Terre à Rio en 1992. Il a été recommandé d'intégrer des éléments de la qualité de l'eau à la gestion des ressources en eau, trois objectifs ont été retenus

- La protection de la santé publique, incluant l'eau potable sans risques et le contrôle des vecteurs de maladies;
- Le maintien de l'intégrité des écosystèmes par la protection des écosystèmes aquatiques contre la dégradation des bassins;
- Le développement des ressources humaines.

Les principes de Dublin et de Rio constituent le fondement des débats touchant la gestion des ressources en eau, ils sont désormais reconnus à l'échelle internationale. Depuis, en moins de dix ans, plusieurs organisations internationales ont été créées : le Partenariat mondial de l'eau (GWP), le Conseil mondial de l'eau (CME), le Réseau international des organismes de bassin (RIOB), le Secrétariat international de l'eau (SIE), le Conseil de concertation pour l'approvisionnement en eau et l'assainissement (WSSCC) et l'Office international de l'eau (OIEau), pour n'en citer que quelques-unes. Des conférences internationales majeures, au cours de la même période, ont aussi marqué le débat sur les enjeux associés à la gestion de l'eau. Le forum mondial de l'eau organisé à Marrakech en 1997, a marqué un événement prépondérant pour la relance du débat à l'échelle mondiale sur la question de l'eau douce. Le conseil mondial de l'eau lançait par la suite une opération internationale innovatrice, appelée la Vision mondiale de l'eau, qui mobilisera les débats au cours des années 1998 et 1999, pour culminer lors du deuxième Forum mondial de l'eau tenu à La Haye, en mars 2000. Venues de tous les continents, plus de dix mille personnes ont participé à cet événement inédit pour partager leurs savoir faire, leurs aspirations et leurs recommandations pour une utilisation durable des ressources en eau. L'Unité vision mondiale de l'eau a publié, en mars 2000, un document influent intitulé "la Vision mondiale de l'eau – L'eau: l'affaire de tout le monde". De nombreux importants documents de réflexion ont été produits, autant par régions, par pays que par différentes thématiques (L'eau et l'alimentation, L'eau et la nature, etc.). C'est dans les locaux de la division des sciences de l'eau de l'UNESCO que les travaux de cette unité se sont déroulés (CME, 2000).

Les idées développées par le processus devant conduire à la vision mondiale de l'eau, les principaux résultats de cette vaste consultation et même le vocabulaire employé, vont certainement influencer, pour plusieurs années encore, l'ensemble du débat international sur les ressources en eau. De nombreuses observations ont été faites au cours de l'exercice menant à la vision, de grandes orientations ont été proposées en matière de l'usage des ressources en eau et de sa gestion par bassin. Voici trois énoncés qui ont particulièrement attiré notre attention.

"Il existe aujourd'hui une crise de l'eau, qui n'est pas due à son insuffisance à satisfaire nos besoins; elle résulte plutôt d'une si mauvaise gestion de cette ressource que des milliards de personnes, et

l'environnement, en souffrent grandement." (CME, 2000, p. 19). Dans un débat médiatisé à outrance, le premier énoncé associe plus facilement les pénuries d'eau à de grandes catastrophes et à des phénomènes naturels tels les changements climatiques, qu'à des erreurs humaines. Une bonne gestion de l'utilisation de l'eau est une solution de sa grave crise actuelle. La gestion intégrée des ressources en eau et son développement durable est visé dans le second énoncé. *La Vision recommande un accès sain et suffisant à des ressources en eau pour satisfaire ses besoins, sur le plan alimentaire, mais de manière à entretenir l'intégrité des écosystèmes d'eau douce. Elle vise à avertir l'opinion mondiale à la crise de l'eau que vivent l'être humain et à trouver des solutions pour la régler. Cette sensibilisation conduira à l'élaboration de nouvelles politiques et de nouveaux cadres législatifs et institutionnels. Les ressources mondiales en eau douce seront gérées de façon intégrée à tous les niveaux, des particuliers aux entités internationales, afin de servir efficacement, rentablement et équitablement les intérêts de l'humanité et de la planète.* (CME, 2000, p. 1). L'énoncé qui a retenu notre attention concerne particulièrement le partage des rôles entre les divers niveaux d'intervenants, de l'individu aux autorités publiques, en passant par celui des professionnels. *...Le rôle et le comportement des gens doivent changer dans un sens où le développement et l'utilisation des ressources en eau aient un caractère durable. Les particuliers et les groupes qui forment des familles et des collectivités seront les principaux acteurs et devront assumer de nouvelles responsabilités en matière d'utilisation de l'eau et de services connexes. Les autorités publiques devront les soutenir et les habiliter et exécuter des travaux qu'ils ne peuvent réaliser. Les environnementalistes et les professionnels de l'eau procureront à ces acteurs l'information dont ils ont besoin afin de participer à la prise de décision ainsi qu'à leur mise en œuvre. En travaillant en semble, la Vision peut être concrétisée.* (CME, 2000, p. 13-14). Comme son nom le laisse entendre, cette vision fournit des scénarios pour l'avenir des ressources en eau à moyen terme. Elle recommande une liste d'enjeux, appelés 'points tournants dans l'avenir de l'eau' dont certains sont en ligne directe avec la gestion par bassin: la valorisation des fonctions des écosystèmes, la réforme des institutions chargées de gérer les ressources en eau l'accentuation de la coopération dans les bassins internationaux sont de ceux-là.

1.3 Le plan d'action

Pour passer de la Vision à l'action, un programme mené par le Partenariat Mondial pour l'Eau (GWP), parallèle à celui de la Vision, a jeté les bases d'un plan d'action intitulé 'De la vision à l'action' (GWP, 2000). Ce programme vise à concrétiser chacun des objectifs de la Vision, il présente une série d'actions à entreprendre qui permettront d'évaluer la progression. Une fois développé, Le plan d'action indiquera quelle combinaison d'outils de gestion, de politiques, de priorités d'investissement et de stratégies de mise en œuvre seront les plus favorisées pour atteindre les objectifs de la Vision. (GWP, 2001, p. 2). Plusieurs éléments de ce plan touchent directement le thème de la gestion intégrée des ressources en eau (IWRM, Integrated Water Resources Management).

1.3.1 Une nouvelle éthique de l'eau

Sur le plan éthique, la question de l'eau a aussi fait l'objet de débats, avec la publication du 'contrat mondial' (Petrella, 1998), ce document a joué un rôle catalyseur et a renouvelé le débat sur la question de l'eau. La valeur économique de l'eau a été le plus souvent abordée sous l'angle de la tarification des services et fréquemment associée à la privatisation des services d'eau. Le manifeste souligne que la reconnaissance de l'accès à l'eau est un droit fondamental. Certe que l'eau a une valeur, en raison de son caractère essentiel, mais elle ne peut pas être traitée comme un simple bien économique. Fait passionnant, le considérant initial de la directive européenne sur la politique communautaire dans le domaine de l'eau, édicté en octobre 2000, retient le principe suivant: "L'eau n'est pas un bien marchand comme les autres mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel." (Communauté européenne, 2000, p. 1). L'accès à l'eau pour tous et sa gestion solidaire et durable sont les deux principes de base du contrat social proposé par Petrella (1998). La question de l'eau est apparu à nouveau au public depuis le débat entre ceux qui soutiennent la thèse du recouvrement des coûts de l'eau par tarification avec un accès pour tous les gens et ceux qui la considère comme un bien public et collectif. Débat qui était centré notamment sur les diverses modalités de privatisation des services d'eau en milieu urbanisé, et jusqu'alors n'impliquait que des experts du domaine. Une initiative de l'académie de l'eau, appelée "la charte sociale de l'eau", a été largement enrichie avant d'être présentée en mars 2000 à La Haye. Trois recommandations ont été proposées par cette charte et ont fait par la suite la synthèse quant au consensus dégagé lors des conférences internationales :

- La gestion de l'eau pour tous les hommes et leurs descendants, en préservant l'environnement avec une politique de développement durable (Rio, 1992).
- Associer étroitement les usagers aux choix d'aménagement (Dublin, 1992).
- L'eau est un bien économique et social qu'il faut prévoir son accès pour tous (Dublin, 1992; Paris, 1998). (Académie de l'Eau, 2000, p. 2).

L'écosystème, une notion clé dans toute approche dite durable de gestion des ressources en eau et de ses usages. Il convient de rappeler brièvement cette notion de base essentielle. Incluant l'homme et ses activités anthropiques, il s'agit d'un système organisé, avec des composantes physiques, chimiques et biologiques. Des concepts fondamentaux sont associés à la définition de l'écosystème:

1. Les écosystèmes sont ouverts d'énergie et de matière, des compositions, sous différentes combinaisons, des structures, et qui évoluent avec le temps, par des fonctions. ils sont en évolution constante en réaction aux pressions exercées par les populations qui les composent et par l'évolution de l'environnement physique.
2. Les êtres humains font partie des écosystèmes. Il faut préserver la santé et l'intégrité des systèmes naturels pour assurer notre propre survie. Le maintien de la vie est une caractéristique des systèmes et non seulement des espèces.

3. Le choix de l'échelle des écosystèmes, spatiale ou temporelle, dépend de la problématique à gérer ou des activités humaines qui se posent.

La gestion durable des ressources en eau tient compte à la fois du milieu naturel et de l'être humain, unis dans le même système. La notion d'écosystème réunie à la fois les dimensions environnementales, sociales et économiques.

1.3.2 La gestion par bassin

Le bassin versant, une entité qui regroupe les ressources naturelles et les collectivités humaines qui en dépendent, n'est pourtant pas rien qu'une unité hydrologique, c'est aussi une entité de gestion de l'eau qui joue un rôle primordiale pour la production agricole et économique. (Wani et al., 2008). « ... *c'est l'espace qui reçoit l'eau des précipitations et alimente les cours d'eau. Limité par une ligne de partage des eaux, il possède un réseau hydrographique qui collecte le ruissellement en provenance des versants ainsi qu'une charge formée de sédiments, de matières organiques particulières et de substances dissoutes. Un cours d'eau peut être considéré une artère du bassin versant véhiculant de l'eau, de la matière organique et des éléments minéraux vers la mer* » (Amoros et Petts, 1993). Appelée souvent bassin de drainage, le bassin hydrographique est défini comme une zone dans laquelle toute l'eau qui s'accumule va vers une sortie commune (Lasserre et Brun, 2007). Les activités que les gens pratiquent dans le bassin font partie intégrante du système qui détermine la circulation de l'eau. Par conséquent les différentes phases du cycle de l'eau dans un bassin versant, sont soumises aux activités humaines et des diverses caractéristiques naturelles du milieu physique. Il y a une quarantaine d'années que la gestion par bassin hydrographique comme base de la gouvernance de l'eau a été conceptualisée, et s'est étendue par la suite à l'échelle mondiale.

Une examination d'ampleur a été menée sur le thème de la gestion par bassin lors du deuxième Forum mondial sur l'eau. Le compte rendu de l'atelier technique, qui a été organisé à La Haye en octobre 1999 en préparation au Forum, est particulièrement intéressant, d'abord par la variété des études de cas présentées, mais surtout parce qu'il établit une synthèse notable des débats entourant toute la question de la gestion par bassin (Mostert, 1999). Les constats de cette réflexion ont été ensuite regroupés sous forme de recommandations et présentés lors du deuxième Forum mondial de l'eau de La Haye en mars 2000 (Netherland, 2000). Ces deux documents importants regroupent en plus des exemples concrets d'application, des points de vue théoriques. Au cours des années 1999 et 2000, et à travers les deux forums, un passage en revue sur tous les éléments de la gestion par bassin à été presque atteint à l'échelle internationale. Pour une gestion durable des ressources en eau, l'utilisation du bassin versant comme territoire est la plus approprié, il s'agit de nos jours d'un principe universellement reconnu.

Le rapport du deuxième Forum mondial sur l'eau dans sa déclaration ministérielle sur la sécurité de l'eau au 21e siècle, énonce la gestion par bassin comme un des défis associés à la question de la

sécurité : *Développer la coalition entre les différentes utilisations de l'eau à tous les niveaux, partager la ressource en eau, améliorer la coopération pacifique, et dans le cas des ressources en eau frontalières et transfrontalières, entre les États concernés, par des méthodes appropriées et une gestion durable des bassins versants.* (CME, 2000a, p. 29). La flexibilité laissée aux gestionnaires quant à la méthode à adopter est passionnante, ils n'ont pas été limités d'appliquer la gestion par bassin comme une règle absolue, mais cette méthode a été proposée comme une des voies intéressantes pour améliorer la coopération. Pour une meilleure utilisation de l'eau et pour assurer une meilleure coordination entre les utilisateurs de cette ressource, Il est maintenant admis que cette échelle d'analyse et de gestion est devenue cruciale. Les approches classiques fragmentaires et unidimensionnelles de gestion des ressources en eau ne sont plus adaptées, mobilisant une grande diversité d'usagers et avec leurs caractéristiques complexes. (Auger et al., 2004 ; OECD, 2003). L'échelle d'analyse de la ressource en eau a été modifiée par la façon d'aborder sa gestion. Le bassin hydrographique est devenu donc l'unité de gestion, dans lequel, en plus des dynamiques d'occupation des sols, les eaux superficielles et souterraines sont liées entre elles. (Brüschweiler, 2003 ; Ghiotti, 2007). L'échelle de gestion par bassin vise également la gestion du bassin hydrographique comme une entité à part entière dans le but de maintenir l'écosystème de manière durable. (UNESCO, 2009). Le choix du bassin versant comme unité de gestion pose tout de suite un problème de taille, s'il s'avère que la prise de décision quitte le cadre exclusif de l'hydrologie ou de l'hydraulique, ça concerne contrairement toutes disciplines mobilisées dans les problématiques d'aménagement. Réellement, toute décision relative à l'eau inclut une dimension spatiale écologique, quantité et qualité de la ressource allouée aux écosystèmes, d'aménagement par les constructions d'infrastructures, sociale et politique tel la nature et la localisation des différentes catégories d'usagers. Cette échelle d'analyse a été recommandée depuis le troisième forum mondial de l'eau en 2003. À partir de, les approches intégrées de gestion des ressources en eau adoptent le bassin versant comme l'unité pertinente qui convient parfaitement à la gestion. (Burton, 2003 ; Le Goulven et al., 2005 ; Sghaier et al., 2006 ; Agenda 21 pour l'eau, 2011). Toutefois, ce concept se décline différemment d'un pays à l'autre en fonction des problématiques et des réalités locales.

1.4 La gestion intégrée des ressources en eau

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE), le sigle anglais IWRM, pour Integrated Water Resources Management, c'est la nouvelle notion qui a été introduite en 2000. conformément à sa définition la plus souvent utilisée, "*...C'est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et le développement, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social en résultant, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux*" (GWP, 2000, p. 24). La notion de la GIRE englobe les trois principales valeurs collectives liées au développement durable. La durabilité environnementale, L'équité sociale, l'efficacité et la rationalité économiques sont tous projetés sur le devant de la scène.

1.4.1 Objectifs de la gestion intégrée de l'eau

Les principaux objectifs auquel entend répondre la gestion intégrée des ressources en eau, désormais internationalement reconnue comme la meilleure approche pour une mise en valeur et une gestion efficace, équitable et durable sont les suivants:

- Habilitier les femmes, les hommes et les collectivités à décider de leur niveau d'accès à de l'eau potable et à des conditions de vie hygiéniques, à choisir le type d'activités économiques prêtant à l'utilisation d'eau qui leur convient et à s'organiser pour y parvenir;
- Produire davantage de nourriture, concevoir des moyens d'existence durables par unité d'eau utilisée, garantir un rendement agricole accru et un plus grand nombre d'emplois pour chaque goutte d'eau, et s'assurer que toute la population peut se procurer la nourriture dont elle a besoin pour vivre de façon saine et productive;
- Gérer l'utilisation de l'eau afin de conserver le nombre et la qualité des écosystèmes terrestres et d'eau douce qui rendent des services aux êtres humains et à tous les organismes vivants.

La vision mondiale de l'eau prévoit cinq principaux moyens d'action pour atteindre ces objectifs:

- Faire participer toutes les parties intéressées à la gestion intégrée.
- Instaurer la tarification de tous les services d'eau en fonction de la totalité des coûts.
- Augmenter le financement public pour la recherche et l'innovation dans l'intérêt de la population.
- Reconnaître la nécessité de coopérer à la gestion intégrée des ressources en eau dans les bassins fluviaux internationaux.
- Accroître massivement les investissements dans le domaine de l'eau. (CME, 2000, p. 2 et 3)

La gestion de l'eau était fragmentée entre divers secteurs ministères et économiques, qu'elle négligeait constamment les interrelations entre l'eau et les sols, les aspects qualitatifs et quantitatifs, les zones en amont et en aval, et entre le maintien des écosystèmes et le cycle hydrologique en général. C'est ce qui a ouvert la voie à l'émergence de la gestion intégrée. Le plan d'action vise d'atteindre un des objectifs spécifiques de la Vision, soit l'implantation de 75% de politiques et de stratégies de la gestion intégrée vers 2005 et pour tous les pays vers 2015». (CME, 2000a, p. 57). Pour y arriver à concrétiser cet objectif, il faudra donc:

- Des lois nationales flexibles et transparentes sont un préalable à la GIRE;
- Des politiques nationales qui tiennent compte de la gestion par bassin;
- La participation des intéressés à tous les niveaux;
- L'implication accrue des femmes dans la gestion de l'eau comme partenaires importants, surtout dans les pays en développement;
- L'amélioration des structures et des processus de consultation à tous les niveaux;
- La coordination et le renforcement des institutions pour dépasser la fragmentation des responsabilités;

- Un financement additionnel particulier dans toute action en relation avec la gestion de l'eau;
- L'augmentation de la sensibilisation et les communications;
- L'équilibre entre les secteurs privé et public sont nécessaires (CME, 2000a, p. 56 et 57).

La GIRE dans sa forme originale est d'abord un ensemble de principes qui recommande d'accorder une attention égale en plus de la dimension environnementale de l'eau, le côté économique et sociale. En plus de participation du public et de gestion coordonnée de l'eau dans tous ses fonctions écosystémiques et ses usages humains.

Le concept de la GIRE reconnaît la complexité technique et sociale des problèmes de gestion de l'eau, l'augmentation de la compétition, les conflits et les impacts environnementaux, la dégradation et l'épuisement des ressources qui ont caractérisé le secteur de l'eau particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Par rapport à la gestion par bassin traditionnelle, quel est l'apport de bien de la gestion intégrée et pourquoi avoir introduit ce nouveau concept ? Dans plusieurs modèles plus traditionnels, la gestion par bassin mettait l'accent sur l'approvisionnement en eau avec une tarification en se basant sur le principe des usagers-pollueurs-payeurs. Certainement que cette approche a du mérite mais le fait qu'il existe d'autres découpages importants que celui du bassin, elle trouve ses limites. La GIRE incarne des valeurs qui ont longtemps été négligés et cherche à harmoniser la durabilité de l'environnement et l'équité sociale avec la croissance économique. ce nouveau concept cherche de réintroduire de manière forte des principes et valeurs qui ont longtemps été ignorés. L'idée de durabilité parallèlement avec la prise de conscience environnementale, sont réaffirmé par la gestion intégrée. Le concept de la GIRE a pris en considération le développement durable et la bonne gouvernance, il a émergé comme une réponse aux dégradations environnementales, aux répercussions sociales, et à l'inefficacité de la gestion publique. Depuis Dublin la GIRE a progressivement pris en compte une «...*Gestion coordonnée de l'eau, de l'usage de la terre et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux* » (GWP, 2000). L'objectif majeur de ces évolutions consiste à prendre en compte la préservation des ressources en tenant compte des dimensions environnementale, économique et sociale pour un développement durable des territoires. La GIRE devient un concept encore plus important qui s'intéresse à l'interaction entre l'Homme et la Nature (Gangbazo, 2004). La gestion de l'eau demande de conduire une approche pluridisciplinaire qui regroupe différentes dimensions de l'ordre d'améliorer des connaissances sur les écosystèmes, l'hydrogéologie, la physique, les politiques d'aménagement et les actions anthropiques. La GIRE traite les questions de la ressource en eau de façon plus large entre des intérêts liés à l'eau en amont et en aval des bassins versants, les relations entre l'eau douce et la gestion de la zone côtière, entre l'eau verte et l'eau bleue, entre les eaux superficielles et souterraines et entre la qualité et la quantité de l'eau. (GWP, 2000). Ces analyses sont conduites en privilégiant les interactions avec les activités anthropiques et la structuration des politiques publiques telles la gestion

intégrée de l'eau et des eaux usées (Delden et al., 2011). La GIRE est l'ensemble de la gestion de la ressource, de la gestion de la demande et de la gestion des aménagements. La figure 1.3 présente une vision thématique de la gestion intégrée qui implique la participation à la gestion du bassin des personnes intéressées ou qui seront touchées par les décisions relatives aux ressources en eau: agriculture, industrie, aménagement urbain, navigation, loisir, etc. Ainsi que le libre accès aux informations qui facilite l'identification de solutions adaptées (Pouget et al. 2003).

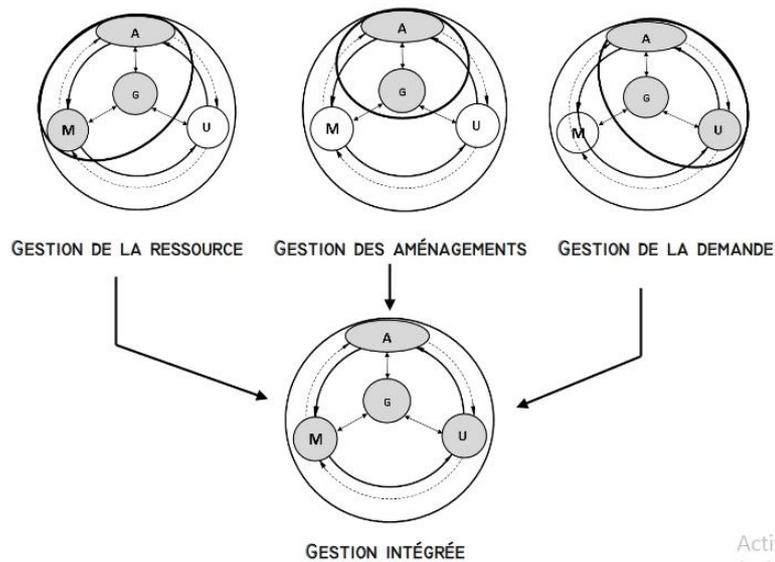


Figure 1.3. Vision thématique de la gestion intégrée (Pouget et al. 2003) avec A : Aménagement ; G : Gestion ; M : Milieu ; U : Usages

1.4.2 Approche à deux voies de la GIRE

La gestion intégrée ajoute au concept de gestion de l'eau les notions d'organisation, de coordination, d'intégration, d'interdépendance et de hiérarchisation. (Reynard, 2000). L'intégration des différentes échelles de gestion de la ressource sont soit horizontale, entre différents secteurs et les politiques environnementales, des usages et des acteurs, soit une intégration verticale à travers différents niveaux d'autorité, et dans le domaine des prises de décisions et de l'élaboration des politiques. L'approche à deux voies de la GIRE avec le principe de double intégration repose sur la collaboration et la décentralisation du système. L'identification et la prise en compte des interactions exigent l'implication de l'ensemble des acteurs du domaine, en plus de ceux qui prennent des décisions de gestion de l'eau et des sols, ceux qui seront touchés par ces décisions (GWP, 2009).

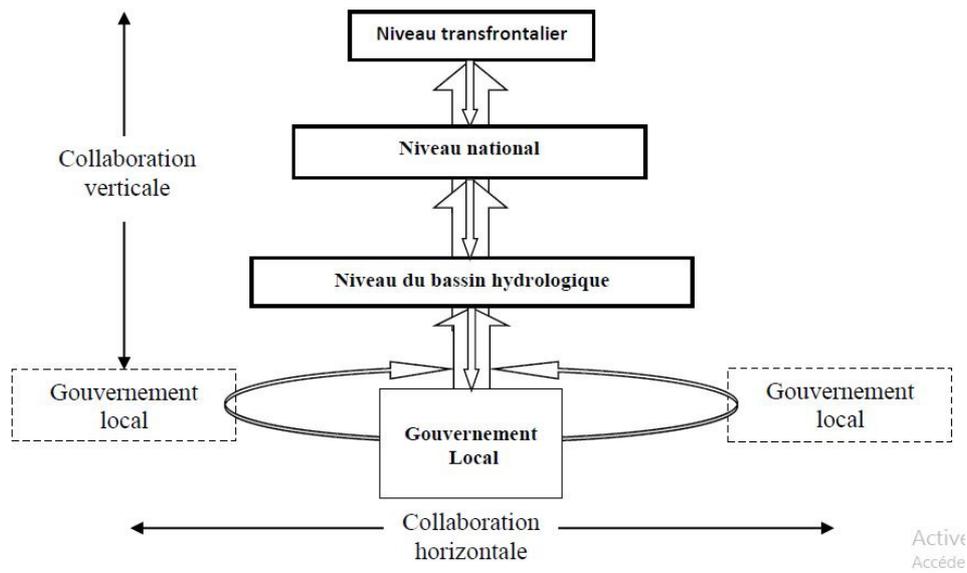


Figure 1.4. l'approche à deux voies de la GIRE (Philip et al.2008)

La collaboration des acteurs à tous les niveaux est facilitée dans un contexte de régionalisation, où la décision peut être prise à partir de la plus petite unité de gestion en respectant le principe de subsidiarité. Du coup, les acteurs locaux sont impliqués par leurs rôles dans le système de gestion. La société civile est obligé d'améliorer l'efficacité de la prise de décision en apportant de nouvelles solutions innovatrices. Elle est concernée dans la définition des politiques et la planification. (Réseau International des Organismes de Bassins, 2002). La gestion intégrée, par la mise en œuvre concrète de réglementations socialement acceptables, élaborées dans la concertation avec les acteurs à tous les niveaux, vise une gouvernance efficace de l'eau.

1.4.3 Collaboration horizontale

La participation des acteurs concernés à la planification et la gestion, la communication et la collaboration des gens, constituent des éléments primordiales pour atteindre une gestion globale et équilibrée de l'eau. (Scoullou et al 2002). La collaboration horizontale devrait inclure tous les usagers d'eau dans le bassin qui ont un intérêt dans la gestion des ressources en eau locales et ne pas se limiter au dialogue entre les gouvernements locaux. Elle permet de résoudre rationnellement les conflits pouvant surgir au sujet de la concurrence pour l'accès aux ressources en eau et pour leur utilisation. (Philip et al. 2008b).

1.4.4 Collaboration verticale

La collaboration verticale est menée à partir d'une base de coordination horizontale entre plusieurs secteurs locaux. Elle doit cibler les divers niveaux hiérarchiques tels que les agences du bassin hydrologique et les institutions du gouvernement national (Philip et al. 2008b). Cela assure que les questions communes et les intérêts sont communiqués hiérarchiquement et auront plus de chances d'agir la législation et les politiques aux niveaux supérieurs. À présent dans le monde, plusieurs

organisations de gestion des bassins hydrographiques mènent une gestion intégrée des ressources en eau et des territoires.

1.4.5 La politique nationale de l'eau en Algérie

Le secteur de l'eau en Algérie a cumulé des retards et a subi l'effet de sécheresse depuis les années 70. L'état a beaucoup investi et promulgué de nouvelles lois dans le but de rattraper ces retards dès les années 80 pour ajuster l'offre à la demande de l'eau. Créé en 1980, le ministère de l'hydraulique était chargé de l'inventaire, la mobilisation et l'affectation de l'eau aux citoyens avec en priorité l'alimentation en eau potable à l'échelle nationale. Trois ans plus tard une loi portant sur le code de l'eau, engage l'Etat sur le droit des citoyens à la satisfaction des besoins domestiques et de l'hygiène. Plus tard en 2005, le gouvernement dans sa stratégie d'améliorer la gouvernance de l'eau, adopte une nouvelle loi venant compléter celle de 1983 dans un cadre de développement durable. Afin d'atteindre une gestion intégrée des ressources en eau, de nouveaux instruments institutionnels ont été promulgués, le territoire nationale a été découpée en cinq unités hydrographiques, des agences de bassins hydrographiques sont mises en place ainsi que des plans directeurs d'aménagement des ressources en eau, des plans quinquennaux nationaux de l'eau, le conseil consultatif des ressources en eau, une administration chargée d'information sur l'eau et l'ouverture au secteur privé. Poursuivant ce changement de politique de gestion de l'eau, la sous-direction de l'hydraulique, créée en 1963, a été affectée à l'actuel ministère des ressources en eau et de l'environnement. Pour orienter la politique en Algérie vers une gestion intégrée des ressources en eau à l'horizon 2030, des plans quinquennaux sont établis. Cependant, malgré ces efforts, la loi insiste sur davantage de programmes de mobilisation pour la satisfaction en eau des citoyens. Avec une politique qui demeure de l'offre, la politique nationale de l'eau reste dépendante de la croissance démographique, de l'augmentation des besoins et du changement climatique.

1.4.6 Evolution des administrations de l'eau

L'administration de l'eau a connu des conversions circonstanciées, le tableau ci-dessous résume les administrations qui ont alternées sur la gestion de l'eau en Algérie depuis l'indépendance jusqu'à nos jours :

Tableau 1.1 : Evolution temporelle et missions des administrations nationale de l'eau

Périodes	Nom de l'administration	Missions et objectifs
1963-1971	Sous-direction de l'Hydraulique de la Direction de l'infrastructure du Ministère de la Reconstruction des Travaux Publics et des Transports	contrôle, orientation des recherches scientifiques, des études appliquées à l'hydraulique, la construction, l'entretien des ouvrages hydrauliques tels les barrages de régularisation interannuelle, et la police des eaux.

1971-1980	Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique	chargé des études des milieux et de la recherche hydraulique.
1980-1985	Ministère de l'Hydraulique	assure la mise en œuvre dans un cadre concerté de la politique nationale dans le domaine de l'hydraulique conformément aux objectifs de développement national afin d'assurer de façon intégrée et unitaire la valorisation des ressources en eau. Le ministère est chargé du développement et la gestion des infrastructures hydrauliques de l'inventaire, de la mobilisation, de l'affectation, du transfert, de la distribution, de la mobilisation, de la gestion et conservation des ressources en eau ainsi que l'étude et la réalisation.
1985-1989	Ministère de l'Hydraulique, de l'Environnement et des Forêts	structuré en administrations chargées de la planification, des moyens, des études juridiques, du contentieux et de la coopération, de la formation, de la recherche, de la mobilisation, des transferts, de la petite et moyenne hydraulique, de l'approvisionnement, de l'assainissement, des périmètres irrigués, de la protection contre la pollution et les nuisances, de la protection de la faune, de la préservation et aménagement des sols.
1989-1990	le Ministère de l'Hydraulique	les activités dans le domaine de la recherche, l'exploration, la production, le stockage, la distribution de l'eau pour tous les usages et propose « la mise en œuvre de la politique des prix et tarifs de l'eau »
1990-1994	Ministère de l'Equipement	le suivi et le contrôle de la mise en œuvre, dans le domaine hydraulique, de la recherche, du stockage et la distribution pour tous les usages.
1994-2000	Ministère de l'Equipement et de l'Aménagement du Territoire en collaboration avec le Ministère de l'Hydraulique Agricole	la recherche, le stockage et la distribution pour tous les usagers.
2000-2016	Ministère des Ressources en Eau	chargé d'adapter pour une meilleure prise en charge du service public de l'eau, les modes d'exploitation et de gestion des infrastructures et réseaux hydrauliques axés sur le développement de la concurrence et l'ouverture au secteur privé.

1.4.7 Le Ministère des ressources en eau

Le ministère des ressources en eau (MRE) oriente la politique de l'eau, il est chargé de la réglementation et de la supervision des activités. D'autres entités s'occupent de la planification, des études, de la construction et de l'entretien des équipements et de la fourniture des services d'eau et d'assainissement ainsi que des services d'irrigation. Le secrétariat général du MRE commande huit directions.

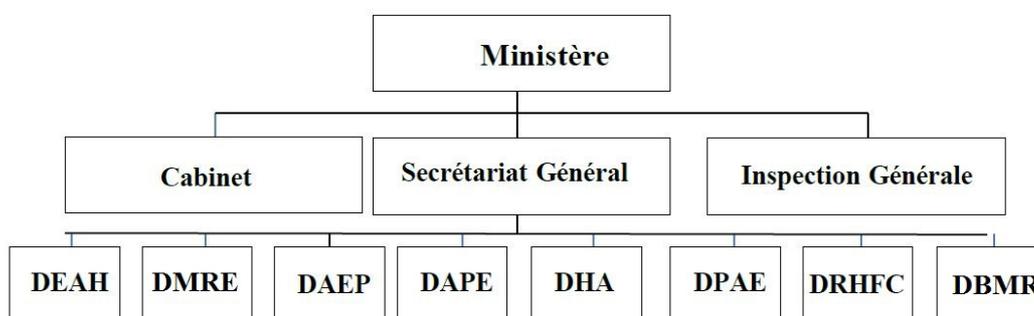


Figure 1.5. Organigramme du ministère des ressources en eau.

Tableau 1.2 : Les missions des différents directions du ministère des ressources en eau .

Directions du ministère des ressources en eau	Missions
La Direction des études et des aménagements hydrauliques (DEAH)	<p>La coordination avec les sous-secteurs des ressources en eau et des projets d'irrigation.</p> <p>Le suivi et la collecte des données.</p> <p>La schématisation des infrastructures hydrauliques et la mise en place d'un système d'information pour le secteur.</p>
La Direction de la Mobilisation des Ressources en Eau (DMRE).	<p>La définition de politique de stockage et de production de l'eau.</p> <p>La surveillance des infrastructures de transfert, de stockage et initiation des études de faisabilité.</p> <p>La proposition des règles et des normes relatives à l'exploitation et à la gestion des infrastructures hydrauliques avec suivi.</p>

<p>La Direction de l'Alimentation en Eau Potable (DAEP)</p>	<p>Le suivi des des programmes, des études correspondantes, des opérateurs et de la mise en œuvre pour satisfaire la demande domestique et industrielle d'eau.</p> <p>Le suivi de la qualité de l'eau et de la répartition des ressources.</p> <p>La définition des règles et des normes relatives à la conception et l'exploitation des infrastructures.</p> <p>L'adoption des réformes de la production et la distribution de l'eau potable.</p>
<p>La Direction de l'Assainissement et de la Protection de l'Environnement (DAPE)</p>	<p>Définition et mise en œuvre des mesures pour la collecte, le traitement et la réutilisation des eaux usées en assurant le suivi des études y afférentes.</p> <p>Surveillance de la qualité des effluents, le fonctionnement et l'entretien du réseau et des stations de traitement des eaux usées.</p> <p>La mise en œuvre des politiques environnementales et sanitaires.</p>
<p>La Direction de l'hydraulique agricole (DHA)</p>	<p>définition des mesures d'irrigation et de drainage.</p> <p>l'élaboration de plans nationaux et régionaux d'irrigation et aux activités de drainage.</p> <p>l'élaboration des normes relatives aux réseaux et au matériel d'irrigation.</p> <p>l'élaboration et l'exécution des politiques et des projets liés à la production et au stockage d'eau d'irrigation.</p> <p>le suivi des activités au niveau du sous-secteur.</p> <p>Reformer l'administration du sous-secteur de l'irrigation.</p>
<p>La Direction de la planification et des affaires économiques (DPAE)</p>	<p>La participation aux études de faisabilité.</p> <p>L'évaluation des impacts économiques.</p> <p>la planification des investissements.</p> <p>La rechercher des financements intérieurs et extérieurs une fois les projets et les programmes sélectionnés.</p> <p>Le suivi de l'exécution des projets et des programmes.</p> <p>Elle est chargée des relations avec le ministère des Finances.</p>
<p>La Direction des ressources humaines, de la formation et de la coopération (DRHFC)</p>	<p>La gestion des ressources humaines.</p> <p>La coopération avec les universités et des activités de recherche.</p> <p>L'archivage des données du secteur.</p>
<p>La Direction du budget, des moyens et de la réglementation (DBMR)</p>	<p>L'évaluation des besoins opérationnels relatifs à l'administration.</p> <p>La gestion de budget correspondant.</p> <p>Le contrôle des dépenses de l'administration.</p> <p>La participation à la rédaction des documents juridiques relatifs au secteur de l'eau.</p>

Au niveau intermédiaire, le ministère est doté de trois établissements publics à caractère administratif :

L'Agence nationale des ressources en eau (ANRH) : elle a pour missions la préservation, la protection et la sauvegarde de la ressource contre toute forme de dégradation par la mise en place de réseaux de contrôle de la qualité et par l'établissement d'une cartographie. Elle est chargée de la prospection et l'évaluation des ressources en eau et en sol du pays par la collecte, le traitement et la mise à jour des informations. Elle est responsable du suivi quantitatif et qualitatif de la ressource en eau et des terrains sous irrigation et drainage.

L'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT): chargée des études de faisabilité et de la mobilisation des ressources en eau afin d'assurer l'alimentation en eau potable et l'irrigation. L'agence est également chargée de la passation des marchés, de l'exécution, du suivi et de l'évaluation des projets, à cette fin, elle contrôle et surveille les ouvrages de retenue d'eau et les systèmes de transfert visant à maintenir l'approvisionnement continu. elle fournit des études sur la qualité de l'eau et les réserves exploitables.

L'Office nationale de l'irrigation et de drainage (ONID): Structure chargée de l'ensemble de l'activité hydraulique agricole dans les grands périmètres d'irrigation. En vue de favoriser une production agricole performante, l'office assure un service public de l'eau agricole visant à assurer sa mise à disposition aux agriculteurs dans des conditions technico-économiques optimales par la gestion, l'exploitation et l'entretien des réseaux d'irrigation et les réseaux connexes.

Au niveau local, dans chaque wilayas du pays, le ministère dispose d'une direction de l'hydraulique qui avec les directions locales des autres départements ministériels constituent l'exécutif de la wilaya. Dans le cadre du nouvelle politique de l'eau, des agences de bassins hydrographiques sont créées en 1996 pour assurer une gestion intégrée en s'appuyant sur des comités de bassin. Ces agences ont essentiellement pour mission:

- De promouvoir et soutenir les projets et actions visant l'économie de l'eau, la préservation de sa qualité et la protection de milieux récepteurs contre les rejets polluant.
- D'élaborer et de mettre à jour le cadastre et la balance hydraulique du bassin hydrographique.
- La collecter de toutes données statistiques, tous documents et informations sur la ressource en eau, son prélèvement et sa consommation.
- La définition des spécifications techniques relatives aux rejets des eaux usées et aux dispositifs de leur épuration.
- La surveillance de l'état de pollution des ressources en eau
- De mener toutes actions d'information et de sensibilisation des usagers domestiques, industriels et agricoles en vue de promouvoir l'utilisation rationnelle et la protection des ressources en eau.

Le pays est divisé en cinq bassins hydrographiques regroupant 19 bassins versants. Le découpage adopté a été essentiellement basé sur les critères suivants:

- Equilibre en ressources en eaux entre les bassins hydrographiques; et en potentialités humaines entre les régions hydrographiques.
- Unité géographique de la ressource en eau superficielle et souterraine dans le bassin versant.
- Equilibre en nombre et importance d'infrastructures hydrauliques et de transferts entre les régions.
- Répartition équilibrée entre le nombre de wilayas et leurs importances économiques (Dahmani&Bithorel 2000; Remini 2010).

«Au niveau de chaque unité hydrographique naturelle, la gestion intégrée des ressources en eau est exercée par une agence de bassin hydrographique, dont les missions, les règles d'organisation et de fonctionnement et le cadre de concertation sont fixés par voie réglementaire» (loi relative à l'eau 5-12, 2005).

Tableau 1.3: Les bassins hydrographiques de l'Algérie.

Bassins hydrographiques	Superficie en km ²	Bassins versants
Oranie-Chott Chergui	77 169	Côtiers oranais
		Macta
		Tafna
Chélif-Zahrez	56 227	Chott Chergui
		Côtiers Dahra
		Chélif
Algérois-Hodna-Soummam	47 431	Chott Zahrez
		Côtiers algérois
		Sébaou
Constantinois-Seybousse-Mellegue	44 348	Isser
		Soummam
		Chott Hodna
Sahara	2 018 054	Côtiers constantinois
		Kébir Rhumel
		Medjerdah Mellegue
		Seybousse
		Hauts Plateaux
		Constantinois
Sahara	2 018 054	Sahara
		Chott Melghir

L'Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE) créée en 2011, placée sous la tutelle du ministère de la ressource en eau, a pour principales missions d'assurer l'orientation, l'animation, la coordination et l'évaluation des cinq agences de bassins hydrographiques. Elle est chargée de réaliser des enquêtes, études et recherches liées au développement de la gestion intégrée des ressources en eau, et collecter l'information sur l'eau au niveau national, et surtout élaborer et actualiser des plans à moyen et long terme de développement sectoriel.

1.5 Conclusion

La gestion des ressources en eau en Algérie est un sujet complexe, dans le sens où elle dépend de nombreuses variables climatiques, économiques, sociales et démographiques. Pour pouvoir entamer une gestion planifiée, rationnelle et concertée permettront de prévenir les crises liées à la ressource en eau et conduire à un développement soutenu et durable, l'Algérie est passé d'une gestion sectorielle à la gestion intégrée des ressources en eau dès 1996, cette nouvelle stratégie qui porte des innovations institutionnelles se présentant dans les agences et les comités des bassins versants, travaillant ensemble sur la protection des ressources en eau contre la surexploitation et la pollution. La mise en œuvre d'une politique nationale de l'eau a pour objectif d'assurer une utilisation planifiée et rationnelle en vue d'une meilleure satisfaction des besoins de la population et de l'économie nationale. Les besoins en eau, sont couverts en quantités suffisantes en priorité pour les populations, l'agriculture, l'industrie, la santé publique, l'assainissement et toute autre activité. La nouvelle politique nationale a une deuxième orientation, il s'agit d'assurer la protection des eaux contre la surexploitation, la pollution et le gaspillage. Les projets d'implantation et d'extension d'unités industrielles consommatrices d'eau doivent tenir compte du critère d'économie d'eau et de procéder au recyclage des eaux utilisées. Les usagers qui dégradent les ressources en eau sont responsabilisés au moyen de redevances qui servent à financer des activités réduisant les impacts négatifs sur l'environnement. Les tensions et les conflits entre les usagers de l'eau et de l'espace ne peuvent être surmontés que par l'élaboration d'un projet commun sur un territoire, avec des choix collectifs et des moyens pour les réaliser, alimentés par des ressources financières mises en commun.

La gestion intégrée des ressources en eau nécessite une proximité géographique entre les usagers et leur environnement. La participation de la population est primordiale, les outils de gestion doivent être développés à une échelle territoriale pour tenir compte des spécificités environnementale et socio-économiques qui varient dans l'espace. Pour que les niveaux de représentation ne soient pas éloignés des acteurs de terrain, la gestion doit passer par la mise en place des cadres d'échange entre les acteurs de l'eau à l'échelle de territoires de taille raisonnable. Le besoin croissant de prospecter, d'exploiter, d'aménager et de gérer la ressource en eau requiert la connaissance et la maîtrise de plusieurs paramètres géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, les données d'infrastructure et socio-économiques. Les systèmes d'information géographique permettent l'intégration de ces paramètres en

plus des images satellite et d'autres données exogènes, ce qui facilite les opérations de gestion et de traitement de l'information, de modélisation et de simulation et la production de documents de synthèse. L'expérience de l'utilisation de la télédétection dans l'étude des ressources en eau montre son apport dans les aspects de cartographie, de prospection et d'aménagement, de suivi et de gestion.

CHAPITRE II

**Apport possible des systèmes d'information géographique et de la
Télédétection**

2.1 Introduction

À travers ce chapitre, une position de recherche sur le rôle des systèmes d'information géographique et la télédétection dans la gestion d'un espace complexe, en l'occurrence les bassins versants, est présentée. Le but est de faire le point sur les apports et les perspectives d'utilisation d'un SIG et les données de télédétection pour le suivi et à l'analyse des changements à long terme d'un anthroposystème, tout en démontrant la place indispensable de la géomatique dans le contexte actuel d'une recherche finalisée en environnement. Le bassin versant est un espace complexe, sa gestion efficace et durable implique une connaissance approfondie de son évolution et de son fonctionnement spatio-temporelle. La maîtrise et la compréhension d'une multitude de variables naturelles, physiques et socio-économiques en interaction, agissant sur une gamme scalaire et temporelle, implique de multiples compétences scientifiques. L'expérience internationale dans ce contexte pluridisciplinaire, et les avancées les plus marquantes concernant la prise en compte de divers conditions climatologiques, écologiques et socio-économiques, se sont notamment appuyées sur les SIG et les données spatiales vue qu'ils permettent une mise en œuvre d'outils technologiques et de méthodes adaptés à l'analyse, l'interprétation, le stockage et la représentation de données de nature et de source diverses. Les SIG sont des outils techniques et scientifiques qui constituent un lien tangible entre les différents compartiments du système étudié (Cuq, 2000). Par leurs capacités d'analyse, de stockage et de représentation de l'information spatialisée, ils contribuent aux réflexions des décideurs et améliorent la connaissance du fonctionnement global des écosystèmes (Aspinall, 1995). Ils synthétisent l'ensemble des progrès conceptuels réalisés dans le domaine de l'information géographique (Denègre, 1992).

Le couplage avec la télédétection, actuellement en plein essor, et la géodésie spatiale, permet d'offrir un atout dans la planification des activités, la gestion et l'aménagement des territoires et l'appui au développement et à la recherche. En plus des paramètres techniques et économiques, les conditions du succès de leur mise en œuvre sont dépendantes aussi des facteurs sociaux, organisationnels et spatiaux (Roche & Bédard, 1997). Cependant, l'intérêt récent de la communauté internationale se traduit par des approches différentes et des visions divergentes qu'il est constamment difficile de cadrer dans le contexte pluridisciplinaire inhérent à la mise en œuvre d'une gestion intégrée d'un projet. L'utilisation des méthodes géomatiques à ce niveau, contribue au développement d'une approche territoriale et écosystémique à l'échelle d'un bassin versant. L'apport des SIG aux sciences environnementales comme support à la gestion des territoires est discuté, tandis qu'ils sont présentés selon différents points de vue qui leur attribuent communément le rôle décisif dans l'analyse, la gestion, le stockage et la représentation de l'information géographique et dans l'aide à la décision qu'ils procurent.

2.2 Système d'information géographique

Les systèmes d'information géographique ont vu leur première apparition aux Etats Unis à partir des années 1970 et se sont propagés progressivement dans le monde entier. Dans le jargon des

scientifiques chercheurs, les SIG sont désigné par le terme générique de « géomatique », Ils s'inscrivent dans un ensemble de méthodes, d'approches et d'outils en constante évolution. Formé d'un préfixe qui signifie la géographie, et d'un suffixe qui signifie l'informatique, la géomatique a *pour objet la gestion des données à référence spatiale et fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion* (Roche, 1997). Elle qualifie *l'Ensemble des méthodes et techniques de l'informatique appliquée aux moyens d'acquisition, de traitement et de représentation visuelle des données géoréférencées, c'est à dire qui sont reliées à une localisation sur la Terre dans un système de référence* (glossaire de cartographie, Comité Français de Cartographie, 1990 ; Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale, COMITAS, SFTP, 1988). La géomatique est une science pluridisciplinaire qui intervient dans la mise en place des systèmes d'information au sein des organismes, et étudie les différentes implications économiques, sociales et juridiques de leur implantation. Elle sert également à élaborer les techniques qui permettent d'obtenir les données servant à produire l'information spatiale. Elle s'implique dans la mise au point et l'utilisation des SIG, et la définition des systèmes de références reliés à la terre. La géodésie, la télédétection, la photogrammétrie, la cartographie la topographie et l'informatique sont les principaux sciences et technologies géomatiques (Bergeron, 1993). La géomatique assure les moyens d'acquisition de données numériques géographiquement localisables (géodésie, télédétection et photogrammétrie), et fournit aussi des outils d'analyse, de gestion et de représentation de cette information. Dans ce contexte, les SIG permettent de réintégrer dans un cadre cohérent les données géoréférencées acquises par différentes méthodes géomatiques, de les analyser et de les cartographier. Ils représentent donc la synthèse des progrès réalisés dans le traitement numérique de l'information géographique (Denègre, 1992).

2.2.1 Principales étapes historiques

Les activités de quatre chercheurs, du début des années 1960 jusqu'en 1975, impliqués dans plusieurs projets de par le monde, sont à l'origine du concept de « système d'information géographique » (Tomlinson & Petchenik, 1988). Malgré les faibles performances de la technologie informatique de l'époque, R. Tomlinson du Canada, décrivait sous ce vocable, la méthode la plus adaptée, en termes de performance et de coût, à l'analyse et à la cartographie des informations environnementales collectées dans le cadre de l'inventaire des espaces canadiens (Canada Geographic Information System). Dans la même période, D.P. Bickmore a été chargé de la réalisation de l'Atlas of Great Britain and Northern Islanden en Grande-Bretagne. Pour un rapport qualité-prix acceptable, il proposait une approche basée sur l'utilisation de technologies informatiques, pour faire face aux critiques dont il est l'objet, du fait de la complexité des documents réalisés et le délai de production non acceptable. Cette approche permettrait en plus du traitement et de stockage des données géographiques, de modéliser les situations et de restituer cartographiquement les résultats (Rhind, 1987). Aux Etats-Unis, une nouvelle méthode de cartographie automatique, fondée sur de rapides réalisations graphiques et peu coûteuses,

a été développée par H. Fisher et J. Dangermond. Cette technique, qui associe à la carte des données statistiques, visait le développement d'un outil technologique novateur afin d'accroître la qualité de la production cartographique et les performances et d'en diminuer les coûts (Coppock & Rhind, 1991). Ces deux chercheurs sont aujourd'hui regardés comme les précurseurs des SIG. La période du 1973 jusqu'au début des années 1990, l'intérêt des institutions nationales, surtout nord-américaines, s'accroît pour assurer le développement de ce type de système intégré. Sur la même période, la motivation va de pair avec l'avènement de l'informatique qui s'accompagne avec la fourniture sous forme d'images numériques des données satellitaires. Ces années ont marquées la base de la recherche universitaire qui aboutira sur les premiers algorithmes d'analyse spatiale et les concepts fondamentaux des SIG. Les premiers systèmes opérationnels voyaient le jour aux laboratoires de recherches universitaires des Etats-Unis, après, ils transféraient le savoir faire aux sociétés privées. À titre d'exemples, on peut citer le logiciel Arc Info de la société ESRI (Environmental Systems Research Institute) fondée par J. Dangermond à la fin des années 1960 et dont l'origine est le « Laboratory for Computer Graphics » de l'Université de Harvard, ou encore plus récemment le logiciel "Geographic Resource Analysis Support System" (Grass) développé à partir de 1982 par les laboratoires de recherche du département de la défense américaine. La commercialisation des SIG débute en 1990, en profitant du développement technologique réalisé en micro-informatique. Les logiciels mis à disposition se diversifient et s'accompagnent d'une gamme de produits matériels permettant l'acquisition et la restitution de l'information géographique. L'explosion de ce marché, concernant à la fois les logiciels, le matériel et les données, particulièrement de l'information géoréférencée numérique, ce qui a multiplié les utilisateurs qui développaient des applications dans des domaines variés. La concurrence commerciale d'une part, et la standardisation des produits d'autre part, en plus de la simplicité de l'utilisation des SIG, ont facilitées l'implantation de ces systèmes dans divers secteurs d'activité. Cette demande croissante a permis l'ouverture rapide du marché des logiciels et des données. Actuellement en Algérie, la communauté des utilisateurs de l'outil géomatique est essentiellement composée des bureaux d'étude, de collectivités locales, et même au sein des universités qui assurent des offres en termes de formations professionnels en SIG.

2.2.2 Définitions et concepts associés

Malgré l'utilisation des SIG au niveau international, et ses domaines d'application diversifiés et son public hétérogène, ça n'a pas favorisé une définition universelle. Son appellation s'applique essentiellement à des fonctions et des composantes différentes selon trois approches principales. Commencant par l'approche cognitive, les SIG sont définis comme un ensemble basé sur quatre composantes majeures : le matériel, les logiciels, l'information géographique numérique, et le personnel qui assure la coordination et le fonctionnement de l'ensemble (Carter, 1989). Compte à l'approche fonctionnelle, il s'applique aux domaines d'application et aux fonctionnalités de l'outil informatique. Les SIG selon l'approche instrumentale sont des outils informatiques, matériel et

logiciel (parfois uniquement logiciel), considérés comme l'élément central du système. La définition officielle s'appuie sur une approche moins restrictive des trois précédentes. Elle adopte les SIG à un ensemble coordonné d'opérations informatisées orientées à utiliser et à produire une information géographique sur un territoire définis. Ce dispositif vise essentiellement à combiner au mieux le savoir-faire, les bases de données et la capacité de traitement, et apporte en plus un appui essentiel dans la prise de décision des responsables d'un organisme. En résumé, les SIG sont définis comme un ensemble de logiciels, de données et des personnes dont la fonction est d'exploiter l'information géographique pour atteindre un but, résoudre une problématique et produire des résultats (Pornon, 1992). Ces approches différentes convergent tous sur le fait que les SIG ont pour objet l'information géographique. Les SIG introduisent la forme numérique en tant que synthèse des formes d'expression classique de l'information géographique, textuelle, cartographique et iconographique (Denègre & Salgé, 1996). Les anglo-saxons utilisent le terme Geographical Information System GIS qui a évolué dans les années 1990 vers un concept plus intégrateur de Sciences de l'Information Géographique (Geographical Information Science) (Goodchild, 1992), tandis que différents concepts sont proposés par la communauté francophone :

Les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS), qui aident à prendre une décision, incluant l'équipement informatique, les données à référence spatiale, les ressources humaines et les procédures de traitement (Bergeron, 1993). Le Système classique d'Information sur le Territoire (SIT) est un outil administratif et économique de décision, essentiellement adapté à la gestion des données cadastrales, alors que le SIG est utilisé plus vastement dans la saisie, l'analyse, la transformation, la modélisation, la simulation et la cartographie des processus et des phénomènes spatiaux (Bédard, 1987).

Les Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE) qui regroupent l'ensemble des moyens et des informations nécessaires qui permettent d'informer un gestionnaire et ses opérateurs sur la structure et l'évolution du territoire (Gayte et al., 1997). il assure les fonctions d'analyse, de gestion des informations issues des observations de terrain et de transmission au niveau décisionnel approprié. Les SIE sont de deux types, un qui regroupe les applications de gestion qui assurent le lien entre le territoire et les opérateurs de terrain en s'appuyant sur des protocoles périodiques simples de façon à permettre une intervention rapide en fonction de l'évolution d'un processus donné. Le second regroupe les applications d'étude et de recherche en plus de celles d'aménagement et d'aide à la décision. Ce deuxième type implique plutôt une expertise extérieure justifiée par des thématiques moins dynamiques et plus complexes. Quels que soient les différentes vocables et approches, tous considèrent les SIG comme une méthode favorisant la résolution de problématiques géospatiales et finalisées.

2.2.3 Les composantes des SIG

les SIG, selon l'approche cognitive, reposent sur la complémentarité de quatre composantes : le matériel, le logiciel, l'information et les ressources humaines.



Figure 2.1. Les composantes d'un SIG (d'après ESRI, 2000)

Le matériel informatique : permet l'acquisition des données, leur traitement, leur stockage et leur restitution cartographique, c'est une plate-forme de travail simple ou en réseau. L'unité centrale de l'ordinateur supporte le logiciel et ses ressources sont utilisées pour le calcul numérique et le stockage. Cette unité est connectée aux périphériques d'entrée et de sortie. Deux types de matériels sont proposés en entrée, pour la numérisation des données d'un support papier : Le scanner et la table à digitaliser. Disponibles en formats différents (A4 à A0), le mode de représentation de l'information géographique résultant de la numérisation se diffère. Le mode vectoriel est traité avec la table à digitaliser, tandis que le scanner fonctionne en mode raster. Comptes aux périphériques de sortie, ils sont utilisés pour la cartographie des résultats. Traceurs et imprimantes de différents formats et modes. Enfin, les unités de transfert externes complètent le mécanisme en permettant l'introduction d'informations numériques et leur sauvegarde.

Le logiciel : Sur le marché international, la disponibilité des logiciels commerciaux est marquante sur différents supports informatiques, ces systèmes supportent les deux modes de représentation de l'information géographique, vectoriel et matriciel, ils assurent la topologie et offrent de puissantes fonctionnalités. Les logiciels sont conçus autour de modules spécialisés particulièrement dans l'analyse spatiale, la saisie, l'édition et la cartographie. La société ESRI touche un public professionnel appréciant les multiples fonctionnalités de l'outil, et occupe avec le logiciel ArcGis, une place importante dans le monde des SIG bureautiques. Cette société est soutenue par une trajectoire privée d'une entreprise dominante sur le marché du traitement de l'information spatiale, avec le mérite

d'être le moyen qui a permis de populariser la vision spatiale à partir d'un perspectif public marketing et non spécialisée. D'autre part, l'initiative la plus temporaire dans le cadre de l'approche GIS, qui a réussi à profiter du plein potentiel du modèle OpenSource, et qui est en concurrence accrue avec les sociétés privées des logiciels SIG, est le Quantum GIS (QGis). Ce logiciel libre et open source est un projet axé sur le bénévolat, géré par une communauté qui a un leadership d'un niveau professionnel élevé. La compatibilité, entre les différents logiciels disponibles sur le marché privés et libres, est acquise du fait de la normalisation des formats d'échange.

Les données : La grande famille des bases de données a ainsi accueilli un nouveau membre, en l'occurrence les bases de données géographiques (BDG), ou bases de données à référence spatiale (BDRS). L'augmentation rapide des capacités de calcul des systèmes informatiques, et le développement d'applications graphiques élaborées, s'est traduit par de nouveaux besoins en matière de gestion de données possédant une référence spatiale. Ces bases assurent la structuration et la gestion d'un grand volume de données, elles facilitent la saisie, la consultation et la mise à jour de ces données. À travers un langage d'interrogation approprié, elles permettent d'extraire, de traiter et d'accéder facilement aux données, tout en assurant la consistance, la sécurité et la protection des données. Une base de données géographiques, ou géodatabase, peut être interrogée, gérer à la fois des données spatiales et non spatiales et être synchronisée avec d'autres géodatabases. Elles se distinguent, par rapport aux bases de données classiques, par les aspects suivants :

- Elles contiennent des données graphiques, en plus des données alphanumériques, qui permettent de définir la forme géométrique et de localiser les phénomènes représentés.
- la prise en compte de la dimension topologique de l'information spatiale, le liens de voisinage, d'intersection, d'adjacence, d'appartenance et d'inclusion qui relient les phénomènes du territoire.
- la combinaison entre deux modes de structuration de l'information géographique, à savoir les modes matriciel (raster) et vectoriel.
- La disposition de plusieurs niveaux de définition de l'information spatiale à travers l'échelle de perception de la réalité.

Le mode relationnel était le plus utilisé par les logiciels commerciaux, le traitement numérique de la donnée brute de l'information géographique est archivé sous forme de couches dans une base d'information géographique structurée (BIG). En mode relationnel, les couches sont dites thématiques, chacune décrit un thème, et contient un seul type des trois modes de représentation des objets géographiques (ponctuels, linéaires ou surfaciques). Ces bases sont composées de niveaux d'information qui correspondent à des degrés d'analyse croissants (Le Berre, 1999). Les opérateurs du relationnel se limitent à l'algèbre relationnelle et ne permettent pas de réaliser certains types d'opérations telles que la recherche d'inclusion-exclusion de points quelconques par rapport à des aires,

il en va de même de mettre en œuvre des fonctions d'optimisation telle le calcul du plus court chemin... Ce modèle ne permet non plus d'exprimer la topologie de manière simple.

De nos jours, les systèmes de gestion de base de données sont basés sur le modèle de données orienté objet qui offre une bonne représentation des entités complexes. La base de donnée spatiale est un modèle relationnel orienté objet, elle utilise une architecture d'application multi-niveaux en implémentant des logiques et des comportements plus avancés dans le niveau d'application. Cette logique applicative inclut la prise en charge d'une série d'objets de données et de comportements de SIG génériques tels que les classes d'entités, les jeux de données raster, les réseaux, les topologies et bien d'autres. Ce modèle de données est implémenté dans des logiciels commerciaux en l'occurrence ArcGis et QGis.

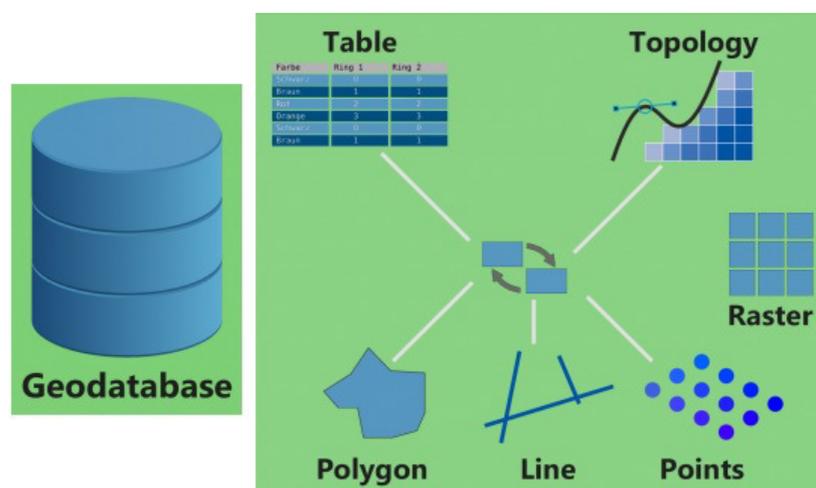


Figure 2.2. Structure d'une base de données géographique.

De manière générale, les SIG permettent la modélisation du monde réel, à condition qu'une approche systémique prévale à leur mise en œuvre (De Sède & Thiérault, 1996). La connaissance des variables constitutives (naturelles, physiques, socio-économiques, politiques...) dans le domaine de l'environnement, ne suffit pas à comprendre son fonctionnement et son évolution. Les ressources humaines constituent la composante majeure du système, leur rôle intervient sur la structure du système elle-même, en fonction des objectifs visés, plusieurs acteurs sont à réunir pour favoriser le déploiement de l'information géographique: le pilote de l'information géographique, les thématiciens, les administrateurs des données localisées, les géomaticiens expérimentés et les techniciens en géomatique (les utilisateurs d'outils SIG). Il est nécessaire d'apercevoir l'ensemble par le principe des interactions de manière à favoriser une approche intégrée et pluridisciplinaire permettant la mise en œuvre d'un développement territorial durable.

2.2.4 Fonctions et domaines d'application

Pendant longtemps, les SIG ont été assimilés aux systèmes de dessin assisté par ordinateur DAO et de conception assistée par ordinateur CAO, alors que leurs fonctionnalités sont beaucoup plus diverses. Assurément, ils sont utilisés pour traiter l'ensemble des aspects d'un même espace, abordés antérieurement à l'aide de sources incompatibles, aussi pour expliciter les relations et les organisations spatiales quels que soient les objets impliqués (Cheylan et al., 1993).

Pratiquement, six fonctions leur sont classiquement attribuées

- l'acquisition des données spatialisées et thématiques ;
- l'archivage des informations sous forme de plans thématiques avec un accès rapide à une géodatabase cohérente des points de vue scalaire, spatial et sémantique ;
- l'accessibilité aisée à l'ensemble des informations de la base soit par un affichage des plans thématiques soit par un accès direct aux fichiers numériques ;
- l'analyse des informations par l'usage d'opérateurs spatiaux et de paramètres permettant de produire une information inédite ;
- l'affichage et la visualisation des résultats obtenus sous différentes formes : cartes ou consultations à l'écran, tableaux, rapports ;
- l'anticipation de l'évolution spatiotemporelle des phénomènes et des problématiques étudiés.

Deux d'entre ces fonctions, sont propres aux SIG (Denègre & Salgé, 1996). La première concerne l'analyse et la synthèse, permet de traiter les relations spatiales entre les objets localisés. L'expertise humaine concerne l'analyse spatiale basée sur les relations entre les objets géographiques, l'analyse temporelle permet de suivre l'évolution d'un phénomène et l'analyse prospective s'intéresse aux simulations d'événements. La seconde fonction primordiale est d'ordre cartographique, permet de représenter l'espace en profitant de la richesse thématique des bases d'information structurées.

Les domaines d'application des SIG concernent l'ensemble des activités où interviennent les données localisées, ils sont utilisés pour gérer et étudier une gamme diversifiée de phénomènes:

- Protection de l'environnement: dans les études des changements globaux, le suivi des changements climatiques, biologiques, morphologiques et océaniques.
- Ressources naturelles: la protection des zones humides, les études d'impact environnemental, la modélisation des eaux souterraines et dépistage des contaminants, la gestion des produits dangereux,
- Études urbaines: planification des transports, sélection d'itinéraires, planification et distribution des flux de véhicules, localisation des accidents, localisation à partir des adresses civiques, développement de plan d'évacuation, sélection de sites.
- Gestion des installations et des réseaux: rééquilibrage des réseaux électriques, localisation des câbles et tuyaux souterrains, planification et entretien des installations, localisation des dépenses énergétiques.

- Administration municipale: gestion du cadastre, évaluation foncière, zonage, entretien des infrastructures, études d'impact environnemental, schémas d'aménagement.
- Santé: dans le suivi de la répartition d'une épidémie, et l'évolution des maladies et des décès, la distribution des services sociaux-sanitaires, les plans d'urgence.
- Affaires: planification des développements et localisation des clientèles visées, études de marchés, analyse de la concurrence et des tendances du marché.

2.2.5 L'information géographique numérique

L'objet pris en compte en géomatique est l'information géographique qu'il convient de distinguer de la donnée, data en anglais. Alors qu'une donnée est le résultat brut de la mesure ou de l'observation, effectuée en référence à une échelle de perception des phénomènes (NCGIA, 1992), l'information est le résultat du traitement d'un ensemble de données pour en dégager des indications synthétiques. La mise à disposition de cette information sous forme quantitative et qualitative constitue l'apport principal des SIG dans les processus d'aide à la décision (Prélaz-Droux, 1995). Les formes d'expression de l'information géographique ont varié au cours des temps et ce n'est qu'à partir des années 1960, avec le développement des SIG, qu'apparaît leur forme numérique, jusqu'alors représentée par une forme analogique, cartes et photographies. L'information géographique est la représentation d'un phénomène réel ou d'un objet localisé dans l'espace, qu'il s'agisse d'un point précis du territoire, d'une infrastructure linéaire ou encore d'un périmètre donné à un instant donné (Quodverte, 1994). Elle est la synthèse des composantes sémantique, géométrique et temporelle, et décrit la réalité selon un degré d'abstraction.

2.2.6 Modes de représentation de l'information géographique

Pour décrire numériquement les objets réels, deux approches de modélisation cartographique ont conduit à formaliser deux modes principaux de représentation, le mode vectoriel et le mode matriciel.

Mode raster : Le modèle conceptuel du mode matriciel, dénommé aussi mode raster, tramé, image ou maillé, est fondé sur la notion de balayage séquentiel d'une matrice organisée en lignes et en colonnes, et formée par des éléments de taille équivalente, appelé pixel, repérés par un numéro de ligne et de colonne. Ces éléments de surfaces, "picture element" en anglais, possède une valeur descriptive discrète (température, distance, profondeur...) ou classifiée (type de végétation, occupation des sols...). Ce mode s'applique aux traitements d'images satellitaires et des photos aériennes, Il inclut la méthode de compression des données tramées par quadrillage hiérarchique (quadtree). La taille du pixel est appelée résolution, et c'est l'équivalent à une distance sur le terrain. Deux types de données raster sont distingués :

- *Les images :* qui sont essentiellement utilisées pour la représentation graphique telle une photo aérienne ou une carte scannée. La matrice de pixel contient l'information qui concerne la couleur de représentation, cette information n'est pas directement accessible.

- *Les grilles* : elles sont adoptées pour les calculs et la modélisation, tel le modèle numérique du terrain. L'avantage réside dans l'information contenue dans la matrice de pixel qui est quantitative (L'altitude dans l'exemple du modèle numérique de terrain), cette information peut être consultée ou modifiée dans la table attributive.

Mode vecteur : Ce modèle conceptuel est plus complexe. Trois primitives graphiques (ponctuelle, linéaire et surfacique) définissent la forme de ses objets où à chacun est associé un ou plusieurs couples de coordonnées dans un espace euclidien à deux ou trois dimensions, en plus des valeurs attributaires. L'ensemble des trois primitives est représenté au sein d'un espace commun, avec des relations spatiales de topologie, ou géométrie de situation, qui permet de les expliciter en assimilant l'ensemble des objets à des graphes planaires. Les objets géographique des données vecteur sont représenté chacun par des primitives graphique : le point et l'arc, les arcs se connectent à leur extrémité ou nœud pour former des lignes et des polygones.

- Les points : Ils permettent de localiser des éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des surfaces, se sont des données non surfaciques, ils n'ont pas de surface réelle comme les puits. La notion d'échelle est très importante lors de la représentation par des points, une ville peut-être représenté par un simple point, ça dépend du thème étudié.

Les lignes : ils représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces, telle une rue ou une rivière, ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau.

Les polygones : ils sont des données surfaciques et représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme les parcelles, les limites administratives des communes, ou tout autre zonage thématique.

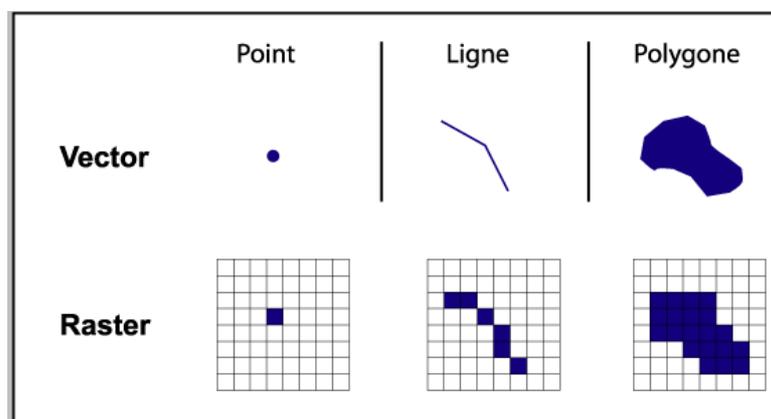


Figure 2.3. Modes de représentation de l'information géographique

Données alphanumériques : ils représentent l'ensemble des données qualitatives et quantitatives (exemple nom de la parcelle et son rendement agricole) associées à chaque entité du fichier de formes. Le lien dynamique entre donnée attributaire et graphique peut se traduire de deux manières :

- à chaque fois que l'on pointe graphiquement sur l'objet d'une couche (une parcelle...) on sélectionne les propriétés de l'objet pointé.
- à chaque fois qu'on pointe sur un objet dans une table attributaire, cet objet est localisé sur la couche d'information associée.

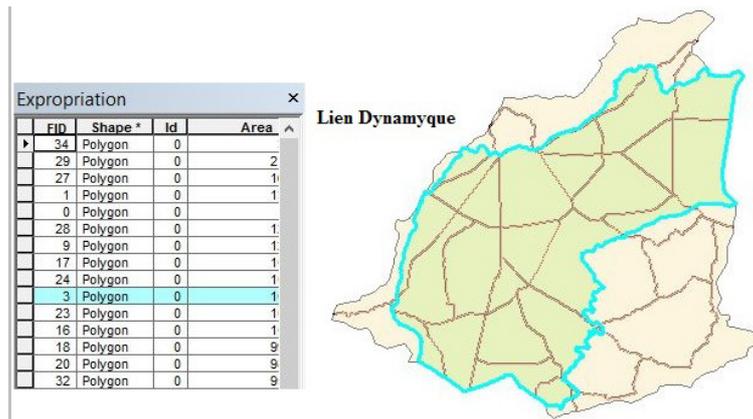


Figure 2.4. Lien dynamique entre l'objet géométrique et son attribut

Comparaison entre le mode vecteur et raster

Kenndey et Meyers, en 1997 ont documentés les avantages et les inconvénients traditionnels du mode raster vis-à-vis le mode vecteur. Les questions fondamentales ont été basées sur la donnée, son volume, son exactitude, la manipulation et l'affichage, l'efficacité de récupération, l'exactitude à la perturbation et les possibilités de traitement.

Tableau 2.1: Comparaisons détaillées entre le mode Vecteur et Raster.

	Raster	Vecteur
avantages	1. Simple structuration de données.	1. Structure de données plus compacte.
	2. la superposition des couches est facilement réalisable.	2. l'efficacité du codage de la topologie, la facilité d'exécution des opérations qui exigent l'information topologique, comme l'analyse en réseau.
	3. Variabilité spatiale efficacement représentée.	3. Mieux adapté à la représentation de la réalité.
	4. Manipulation et perfectionnement efficaces des images numériques.	4. La composante attributaire
		5. stockage économique en mémoire
		6. Sortie graphique de bonne qualité.

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Fichier lourd en mémoire. 2. La structure de données est moins compacte. 3. Qualité médiocre des documents à l'impression. 4. Manque de précision. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Structure de données plus complexes. 2. Analyse spatiale et filtrage à l'intérieur des polygones difficiles. 3. Possibilité de simulation difficile. |
|--|---|

2.2.7 Systèmes de référence de localisation

Dans le système de référence direct, la localisation de l'information géographique numérique d'un point dans l'espace peut être exprimé par trois systèmes de coordonnées : cartésiennes, géographiques et en projection (Pornon, 1992). Les deux premiers expriment la localisation des objets sur un globe en trois dimensions. Les coordonnées projetées sur un plan impliquent de ramener ces objets à leur position en deux dimensions sur un ellipsoïde de référence. Quant à l'altitude des objets, elle est définie par rapport au géoïde de référence qui est la forme que prend le niveau moyen des mers. Les progrès réalisés ces dernières années en géodésie spatiale permettent de connaître à quelques centimètres près, la position géodésique d'un point quelconque positionné à la surface du globe. En Algérie, le système géodésique mondial WGS_84 et la projection universelle de Mercator UTM qui couvrent le territoire national en quatre fuseaux, ont été adoptée pour habiller l'ancien système géodésique Nord Sahara 1959 basé sur l'ellipsoïde local Clarke 1880.

2.2.8 SIG en environnement

Dans le domaine de gestion de l'environnement, les SIG sont mis en œuvre dans des études ou des programmes de recherche finalisée ayant pour perspective l'aide à la décision. Dans ce contexte, la connaissance du territoire incluant ses diverses composantes naturelles, physiques et humaines, ainsi la maîtrise des processus d'évolution qui animent ces composantes est primordiale. Or l'information géographique numérique constitue un élément essentiel à la compréhension du milieu puisqu'elle permet d'analyser les relations spatiales entre les divers paramètres environnementaux, et du fait des possibilités de modélisation qu'elle offre. Les utilisateurs de SIG, qu'ils soient scientifiques ou gestionnaires, s'ils partagent un outil et un objet d'étude commun, ont des attentes complémentaires en ce qui concerne l'utilisation du traitement numérique de l'information géographique (Gourmelon, 2002). Les domaines d'intervention des SIG, du point de vue des gestionnaires, sont extrêmement variés : gestion des ressources naturelles, suivi à long terme des écosystèmes, lutte contre les risques naturels, aménagement du territoire... Pour une perspective d'aider au suivi de l'environnement, ils sont utilisés pour leur capacité à gérer les données localisées et les sites (D'Oleire-Oltmanns, 1997). Pour une institution concernée par l'environnement, la gestion de l'information spatiale de nature et de source variées est une priorité. Le choix de support numérique plutôt qu'analogique offre des garanties

de sécurité et de qualité des données, permet d'améliorer l'efficacité de la prise de décision, facilite l'accès à l'information et augmente les potentialités d'analyse. Les prises de décision lors de la gestion des sites, ont souvent comme support des documents cartographiques élaborés à partir d'une multitude de données spatiales, qui constituent un support aux inventaires, une aide visuelle importante pour le personnel de terrain et un moyen de communication et d'information (Lardon et al., 2001).

En utilisant les SIG dans la gestion des sites, ça permet de mobiliser des informations de sources variées sur un support unique en des temps d'accès limité, de fournir une aide à la conception de cartes répondant à des besoins précis, d'augmenter la production cartographique et d'accroître l'adéquation et la qualité avec les objectifs visés. Pour le suivi de l'environnement, les SIG sont souvent utilisés dans la détection et la modélisation des changements spatiaux, dans la mise en place des opérations de terrain et pour la simulation d'évolution ou d'impacts. Notre environnement est dynamique, et conditionné par l'influence de contraintes naturelles et anthropiques, qui modifient considérablement sa composition, sa structure et la fonction des milieux. Pour une gestion efficace, la capacité à détecter les changements est cruciale car elle permet d'établir des surveillances, de déceler des tendances dynamiques permettant d'établir des prédictions à court terme. Par les méthodes d'analyse diachronique qu'ils offrent, ils sont bien adaptés à la détection des changements spatiaux, et fournissent également un moyen d'évaluation des actions de gestion et sont bien intégrés aux nouveaux modèles de gestion adaptée et interactive (Gibbs et al., 1999). La simulation des changements sur la diversité des milieux et des impacts naturelles et anthropiques permet de proposer la mise en œuvre de nouvelles stratégies de gestion visant à réduire certains aspects négatifs, voire de proposer une gestion par priorité des sites pour restaurer certains milieux à forte valeur patrimoniale ou stratégiquement sensibles. la modélisation et la simulation spatio-temporelle des données spatiales apportent une aide indiscutable par la production de synthèses réalistes de l'évolution de l'écosystème.

2.3 Télédétection

Le lancement du satellite Spoutnik en 1957, constitue le premier pas de la télédétection dans l'ère moderne. Cette science a fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, avec ces nouveaux capteurs qui complétaient la traditionnelle photographie aérienne, qui a connu un essor au cours du 20^{ème} siècle. Depuis, nombreux sont les pays qui ont développé leurs propres programmes de télédétection. La télédétection représente une source potentielle de données parmi d'autres dont l'utilisation est justifiée par la problématique posée, son intégration dans les SIG pour les études environnementales apporte une puissance d'investigation réelle (Robin, 1995). Les apports de cette synergie consistent dans l'enrichissement des SIG par l'imagerie d'une part, et dans les possibilités d'extraction d'information de l'imagerie par assimilation des produits-image dans une géodatabase d'autre part.

Le couplage SIG-télédétection exige des règles méthodologiques strictes (Gourmelon, 2002), les apports de cette synergie s'expriment au niveau de trois démarches environnementales : l'inventaire, la révision et la prévention. Concernant l'inventaire, l'imagerie satellitaire s'avère l'outil indispensable particulièrement dans les régions qui ne disposent pas d'information spatiale adaptée. Sur le thème de l'occupation du sol, des géodatabases sont développées à des échelles régionales uniquement à partir de données satellitaires. L'imagerie satellitaire constitue une source d'information sans pareil pour la planification et la révision, par la répétitivité des observations qu'offrent les vecteurs de télédétection. Elle constitue une source d'informations géographiques de choix dans différents projets de conservation des espaces naturels et de gestion des ressources, de planification urbaine ou littorale, etc. Dans le domaine de la prévention, elle sert pour le suivi de zones soumises à des risques naturels tels que les crues et les inondations, les glissements de terrain, les risques d'incendie et le suivi du changement des températures de surface, ou encore les risques de pollution agricole ou marine.

2.3.1 Définition

La télédétection, « remote sensing » en anglais, est une technique qui permet d'obtenir de l'information sur des objets à travers une analyse de données collectées par des instruments n'étant pas en contact direct avec ces objets. Le Centre canadien de télédétection la définit comme «*La technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information*». Elle implique l'interaction entre l'énergie incidente et les cibles, dans la plupart des cas, le processus se déroule en sept étapes du début à la fin comme il a été détaillé par le centre canadien de télédétection (voire figure 2.5):

- 1. La source d'énergie ou d'illumination (A) : Cette source d'énergie est primordiale pour illuminer les objets dans tout processus de télédétection.*
- 2. Rayonnement et atmosphère (B) : Le rayonnement interagit avec l'atmosphère durant son parcours entre la source d'énergie et la cible. Une deuxième interaction se produit lors du trajet retour entre la cible et le capteur.*
- 3. Interaction avec la cible (C) : L'énergie émise par la source interagit avec la surface de l'objet une fois parvenue à la cible. La nature de cette interaction dépend à la fois des propriétés de la surface et des caractéristiques du rayonnement.*
- 4. Enregistrement de l'énergie au niveau du capteur (D): L'énergie émise ou diffusée par la cible est captée à distance par un capteur pour être enregistrée.*

5. *Transmission, réception et traitement (E)* : L'énergie enregistrée au niveau des capteurs est transmise à une station de réception où l'information est transformée en images numériques, la transmission se fait souvent par des moyens électroniques.

6. *Interprétation et analyse (F)* : L'extraction d'information sur la cible nécessite l'interprétation de l'image traitée.

7. *Application (G)* : L'information extraite de l'image est exploitée pour mieux comprendre la cible, elle permet de découvrir de nouveaux aspects sur l'objet étudié et aide à résoudre un problème particulier.

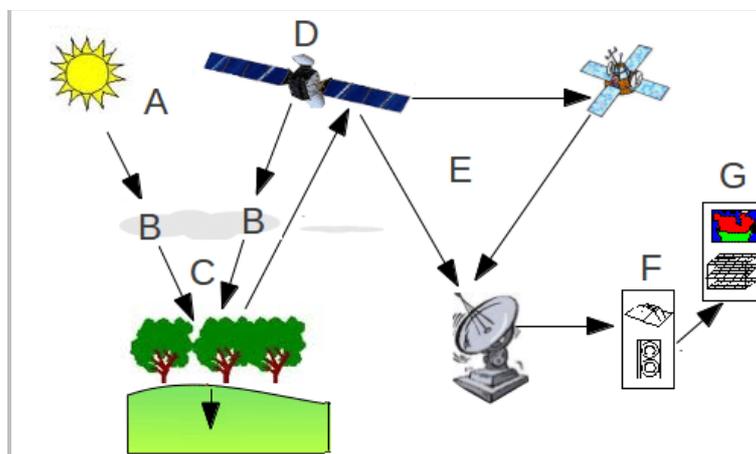


Figure 2.5. Le processus de télédétection selon [Bul 2008]

2.3.2 Spectre électromagnétique

Le soleil est la principale source naturelle d'énergie électromagnétique reçue sur terre, il existe aussi d'autres sources artificielles comme les lampes électriques. Chaque objet de surface émet de l'énergie électromagnétique à cause de l'agitation des particules chargées qui sont présentes dans toute matière. Cette énergie émise par les objets peut aussi être absorbée, transmise et réfléchiée par ces objets eux-mêmes. Le rayonnement électromagnétique est composé d'une multitude d'ondes, chacune caractérisée par sa longueur (λ) ou par sa fréquence (ν), les deux sont liés ($\nu = c/\lambda$, c est la vitesse de propagation des ondes dans le milieu considéré). Le spectre électromagnétique du soleil comprend des rayonnements de longueurs d'ondes très courtes (de l'ordre du 1/100 de micron), comme les rayons X et rayons gamma, ou très longues (jusqu'à des kilomètres), comme les ondes radios. La lumière visible est la partie du spectre électromagnétique qui correspond aux longueurs d'ondes comprises entre 0.4 μm et 0.7 μm , elle revêt une importance particulière pour les utilisateurs. Dans cet intervalle de fréquences, chaque couleur de l'arc-en-ciel correspond à une longueur d'onde particulière (Bleu : $\pm 0.45 \mu\text{m}$, Vert $\pm 0.55 \mu\text{m}$, Rouge $\pm 0.65 \mu\text{m}$). Les caractéristiques du rayonnement électromagnétique

seront modifiées dès qu'il atteint l'objet, puisque ce dernier peut en absorber une partie, et en réfléchir une autre. Pour réaliser la photosynthèse, les végétaux utilisent principalement la partie rouge du spectre solaire. Le spectre lumineux réfléchi est donc amputé de cette partie rouge, et la lumière réfléchie par les feuilles apparaît verte. Une représentation graphique de la signature spectrale des objets, avec en abscisse les différentes longueurs d'onde (les fréquences) et en ordonnée l'intensité du rayonnement réfléchi (Figure 2.6). Chaque objet absorbe une partie du rayonnement solaire, par conséquent, le spectre du rayonnement réfléchi est différent. On appelle l'allure du spectre électromagnétique réfléchi par un objet sa signature spectrale. La télédétection exploite cette propriété, l'analyse des caractéristiques de la signature spectrale d'un objet permet dans une certaine mesure de déterminer certaines de ces propriétés. Fondamentalement, le même principe est utilisé par la vision humaine quand elle exploite la couleur pour identifier des objets. Les capteurs utilisés en télédétection permettent néanmoins d'élargir le champ d'analyse à des parties du spectre électromagnétique allant bien au delà de la lumière visible.

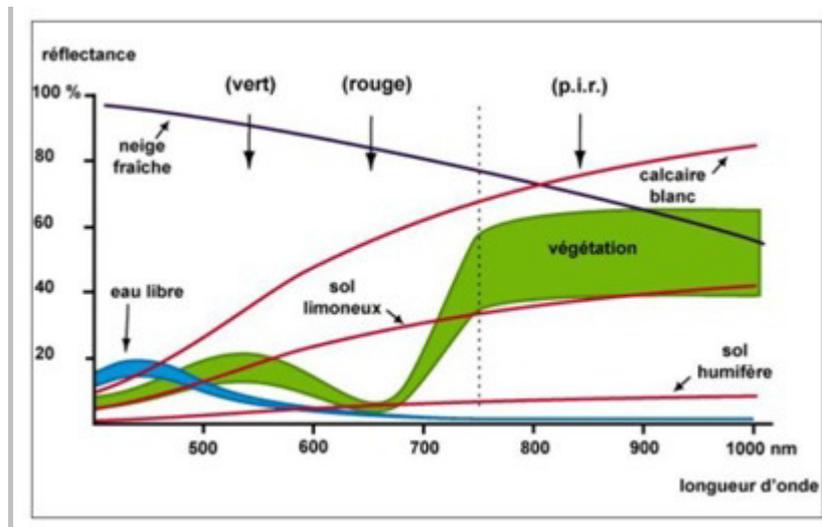


Figure 2.6. Signatures spectrales des objets (Agence spatiale canadienne)

Le spectro-radiomètre est utilisé pour analyser les détails d'un spectre électromagnétique, il permet d'analyser l'ensemble des fréquences d'un rayonnement électromagnétique. D'autres appareils plus simples, ne permettent d'effectuer que quelques mesures, sur les bandes spectrales. Tandis que les radiomètres multi-spectraux fournissent des données discrètes, permettent également de faire la différence entre les divers types de matériaux. Les capteurs utilisés en télédétection couvrent le domaine de l'ultraviolet (<0.3 μm), le visible (de 0.4 μm à 0.7 μm), l'infrarouge proche (de 0.7 μm à 1.5 μm) et l'infrarouge thermique (jusque 1000 μm ou 1 mm). Ces capteurs fonctionnent généralement en système passifs, ils se basent sur l'éclairage du soleil pour mesurer et analyser le rayonnement réfléchi par les objets. D'autres systèmes de télédétection sont actifs, ils émettent un rayonnement vers la surface de la terre et en analysent l'écho. Ils opèrent généralement dans le domaine des micro-ondes ou ondes radar avec des longueurs d'ondes comprises entre 0.1 cm et 1 m.

2.3.3 Interactions rayonnement-cible

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère atteint la surface de la Terre et interagit avec. Lorsque l'énergie incidente (I) atteint la cible, la surface interagira selon trois modes d'interaction: absorption de l'énergie (A), transmission (T) ou réflexion (R), ou selon leur combinaison. La proportion de chaque interaction dépend de la longueur d'onde de l'énergie émise d'une part, et de la nature et des conditions de la surface d'autre part. La réflexion spéculaire et la réflexion diffuse sont les deux modes limites de réflexion de l'énergie. En télédétection, le rayonnement réfléchi par une cible est mesuré.



Figure 2.7. Modes d'interaction rayonnement-cible (Agence spatiale canadienne)

La réflexion spéculaire est produite par une surface lisse, dans ce cas toute l'énergie est redirigée dans une même direction comme si c'était un miroir. Contrairement à la réflexion diffuse, elle se produit quand la surface est rugueuse, par conséquent l'énergie est redirigée uniformément dans toutes les directions. La majorité des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes. La réflexion du rayonnement d'un objet dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à sa longueur d'onde. La réflexion diffuse domine dans le cas où la longueur d'onde du rayonnement est plus petite que la rugosité de la surface ou que la grosseur des particules qui composent la surface. Le sable fin est l'exemple parfait, il paraît rugueux aux longueurs d'onde visibles, et uniforme aux rayonnements à grandes longueurs d'onde. Prenons quelques exemples de cibles de la surface de la Terre et examinons leur interaction avec l'énergie aux longueurs d'onde visible et infrarouge.

La végétation : précisément les feuilles, la chlorophylle est une molécule qui se trouve à l'intérieur des feuilles, elle absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, et réfléchit le vert, cause pour laquelle les feuilles riches en chlorophylle en été, apparaissent plus vertes durant cette saison. Contrairement aux feuilles qui contiennent moins de chlorophylle, en automne elles absorbent moins de rouge, et paraissent rouges ou jaunes (le jaune est la combinaison des longueurs d'onde du rouge et du vert). Pour les longueurs d'onde de l'infrarouge, il est important de souligner que la structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus.

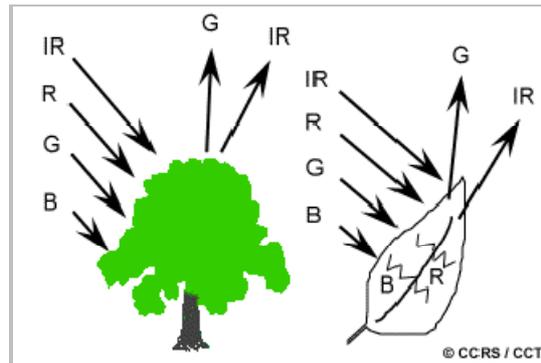


Figure 2.8. Interaction feilles-rayonnement (Agence spatiale canadienne)

L'eau : elle paraît généralement bleue ou bleu-vert parce qu'elle réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, si elle est observée sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge, elle paraît encore plus foncée. Généralement, l'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. La couleur de l'eau se déplacera légèrement vers les plus grandes longueurs d'onde. Il est difficile de différencier entre l'eau qui contient des sédiments en suspension et l'eau peu profonde et claire, lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente fortement, et l'eau paraît plus brillante.

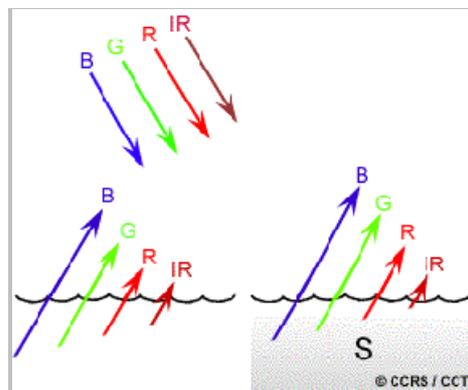


Figure 2.9. Interaction eau-rayonnement (Agence spatiale canadienne)

Ces exemples démontrent que les réponses sont très différentes aux mécanismes de transmission, d'absorption et de réflexion selon la composition des objets et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre. La signature spectrale d'un objet est déduite en mesurant, avec une variété de longueurs d'onde, l'énergie réfléchie ou émise par la cible. Les objets sont distingués les uns des autres en comparant leur signatures spectrales avec plusieurs longueur d'onde, alors que si nous les comparions seulement avec une seule longueur d'onde, nous ne pourrions pas les distinguer. Les signatures spectrales peuvent varier dans le temps et dans l'espace et peuvent être variables pour la même sorte de cible. L'eau et la végétation par exemple, peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont toujours différenciables dans l'infrarouge. Il est important de savoir où

regarder dans le spectre du rayonnement électromagnétique et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible, pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement avec la surface.

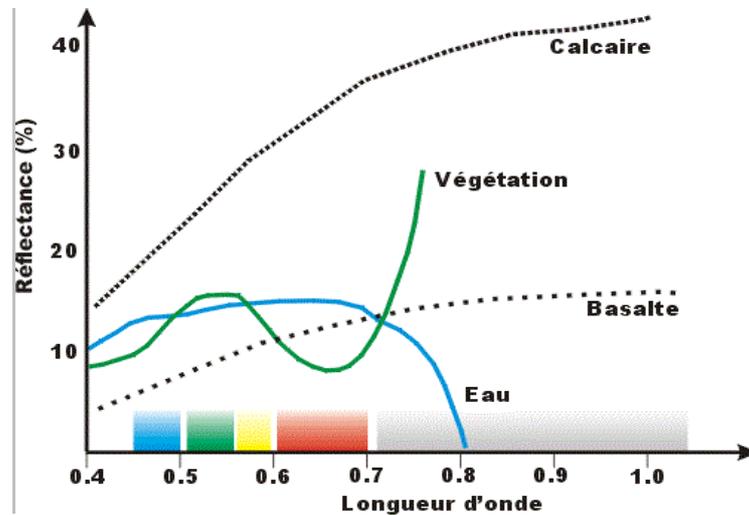


Figure 2.10. Signatures spectrales pour la végétation, l'eau et les roches (Agence spatiale canadienne)

2.3.4 Images de Télédétection

De nos jours, les images numériques sont omniprésentes et malgré que la télédétection était une des premières disciplines basées sur l'analyse et l'exploitation d'images numériques et que nombreuses techniques de traitement d'images ont été mises au point dans le cadre de projets de télédétection, elle ne représente qu'une minime partie des utilisations possibles. Les images acquises par télédétection se caractérisent principalement par leur résolution spatiale et spectrale.

Résolution spectrale: Les capteurs à bord des satellites, en fonction de leurs caractéristiques techniques, enregistrent le rayonnement émis ou réfléchi par les objets de la surface du sol dans des intervalles ou des gammes de longueur d'onde donnés. La résolution spectrale est définie comme l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences différentes. Elle dépend du dispositif de filtrage optique qui décompose l'énergie captée en bandes spectrales plus ou moins larges. La résolution spectrale d'un capteur soit élevée plus ce dernier est sensible à des intervalles de longueur d'onde étroits.

Résolution spatiale: La résolution des images est exprimée par la taille de la zone couverte par un pixel. On parle de "résolution-sol" puisque chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la terre. A titre d'exemple, chaque élément sensible du CCD du capteur haute résolution du satellite SPOT mesure 13 μm, et voit à travers le télescope du système d'observation une zone d'environ 10 x10 mètres à la surface de la terre. Donc la résolution de ce capteur est de 10 mètres. Comme le capteur CCD du satellite SPOT est composé de 6000 éléments sensibles placés le long d'une barrette, le satellite circulant sur son orbite "balaye" une zone de 6000 x 10 m (60km) à la

surface de la terre. La résolution spatiale des satellites d'observation de la terre les plus courants est donnée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.2 : Résolution spatiale des satellites les plus courants.

Satellite	Capteur	Résolution-sol
Landsat	MSS	80m
Landsat	Thematic Mapper (TM)	30m
Landsat8	OLI	30m
Landsat8	TIRS	60m
Sentinel 2	MSI	10m
SPOT	XS (Multispectral)	20m
SPOT	Panchromatique	10m
Ikonos	Multispectral	4m
Ikonos	Panchromatique	1m
Pleiades	1A/1B	50 cm

La télédétection en Algérie

En Algérie, l'Agence Spatiale (ASAL) est l'instrument de conception et de mise en œuvre de la politique nationale de promotion et de développement de l'activité spatiale. Cette politique nationale vise de faire de l'outil spatial un vecteur performant de développement social, culturel et économique du pays et d'assurer la sécurité et le bien-être de la communauté nationale. L'aventure spatiale algérienne lancée au début du 20^{ième} siècle, a déjà contribué au lancement de cinq satellites : le microsatellite de cartographie AlSat-1 en 2002, le satellite d'observation de la Terre AlSat-2A en 2010, les satellites d'observation de la Terre AlSat-2B, AlSat-1B en 2014, le satellite à mission scientifique et de démonstration technologique AlSat-1N en 2016. Le lancement d'AlcomSat-1, le satellite télécoms, est intervenu en 2017. Selon son directeur général, le projet de construction du satellite, AlSat-3, d'observation de la Terre à très haute résolution est actuellement en phase de définition. Le Programme Spatial National (PSN), Adopté par le Gouvernement en 2006 et s'étalant jusqu'à 2020, avec une révision tous les 5 ans, est l'instrument de référence en matière de politique spatiale, il constitue ainsi pour le gouvernement un instrument d'appui au développement durable et de renforcement de la souveraineté nationale. La nouvelle infrastructure spatiale est une composante du

nouveau programme qui court de 2020 à 2040. Le PSN a comme objectif la satisfaction des besoins nationaux, le développement des capacités industrielles, la maîtrise des connaissances et du savoir faire particulièrement dans l'utilisation de la télédétection satellitaire et des systèmes d'information géographique, de la localisation par satellites (GPS, Glonass, Galiléo en perspective), ainsi d'offrir aux différents secteurs nationaux des services des télécommunications spatiales et des outils puissants d'aide à la décision.

Traitements d'images numériques

Avant qu'elles soient exploitées, les images de télédétection nécessitent des corrections, réalisées soit directement par les distributeurs avec un surcoût, soit par les utilisateurs eux-mêmes. Ces corrections sont de type radiométrique et géométrique.

Corrections radiométriques :

Les bruits radiométriques peuvent être présents sur l'image en raison de déficiences des capteurs, de problèmes de transmission des données, ou enfin à cause des erreurs d'interprétation (codage et décodage). Avant d'être analysée par le capteur du satellite, la lumière émise ou réfléchi par les objets doit forcément traverser l'atmosphère, cette traversée perturbe également le signal. Les formes les plus communes de bruits sont les lignes manquantes, les rayures et le rubanement systématique. La présence de gaz et de poussières dans l'atmosphère peuvent réfléchir et/ou absorber certaines longueurs d'ondes, ce qui modifie les propriétés spectrales du rayonnement. S'ajoute le traitement électronique du rayonnement reçu lui-même par les capteurs qui s'accompagne de certaines perturbations. Il est finalement assez difficile de retrouver les valeurs radiométriques fiables et précises à partir des données enregistrées au niveau des capteurs de satellites d'observation de la terre. Généralement les changements de la valeur radiométrique de points aberrants sont effectués directement à la réception de l'image par réaffectation de nouvelles valeurs correspondants aux pixels voisins des points défectueux. D'autres solutions permettent de corriger ces défauts. Tandis que certaines sont basées sur des modèles mathématiques complexes décrivant les interactions principales. L'application de ces modèles efficaces implique que l'on connaisse les valeurs de certains paramètres telle les paramètres atmosphériques lors et au lieu de la prise de vue, ce qui est difficile mais possible vu que des chercheurs ont pu développer un calculateur en ligne des paramètres de correction atmosphérique (J. BARSIS et al., 2003). D'autres méthodes plus classiques se basent sur l'observation de cibles de référence dont la radiométrie est connue. Souvent les surfaces d'eau libre et les étendues de sables désertiques sont utilisées, malgré ça la mise en œuvre pratique de ces corrections reste malaisée. En fait, la grande majorité des recherches en télédétection s'applique sur des données dont la radiométrie n'a même pas été corrigée.

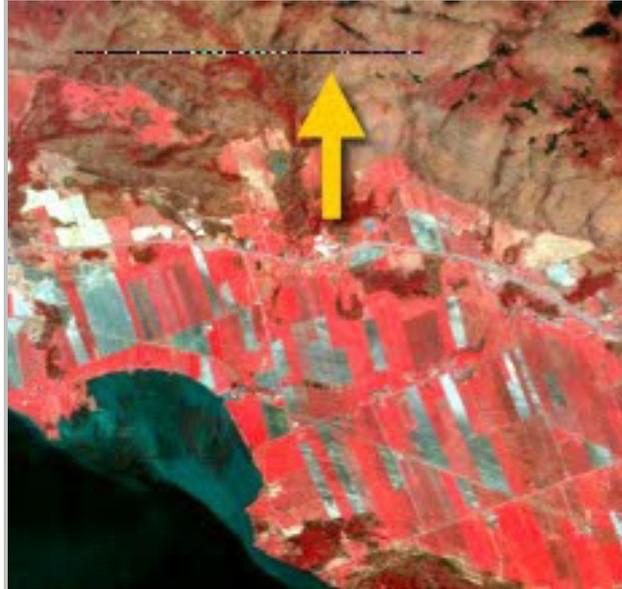


Figure 2.11. Exemple de déficience d'une ligne nécessitant une correction sur image (Agence spatiale canadienne)

Corrections géométriques :

Le passage du satellite et la prise de vue ne se font pas dans des coordonnées parfaitement calées sur les systèmes de projection cartographiques standards. Les effets de rotondité de la terre en plus les mouvements du satellite, les déformations dans les périphéries de l'image due à l'inclinaison des capteurs, sont autant de facteurs qui impliquent une correction géométrique de l'image afin de la rendre superposable d'autres images sous des coordonnées communes ou à des cartes déjà corrigées. Certaines déformations comme l'effet de visée oblique, l'effet de rotation de la terre ou les parallaxes engendrées par le relief, dans les zones où l'altimétrie change fortement, sont prévisibles et il est possible d'en calculer l'effet et d'appliquer des corrections systématiques. Des systèmes sophistiqués au bord des satellites permettent également d'enregistrer les moindres mouvements affectant le satellite. Ces informations servent à corriger la position du satellite et la géométrie des images quand c'est nécessaire. Ces corrections peuvent être réalisées par l'utilisateur sous logiciel de traitement d'image via de points de calages. De nos jours, les images fournies par le distributeur sont généralement corrigées géométriquement.

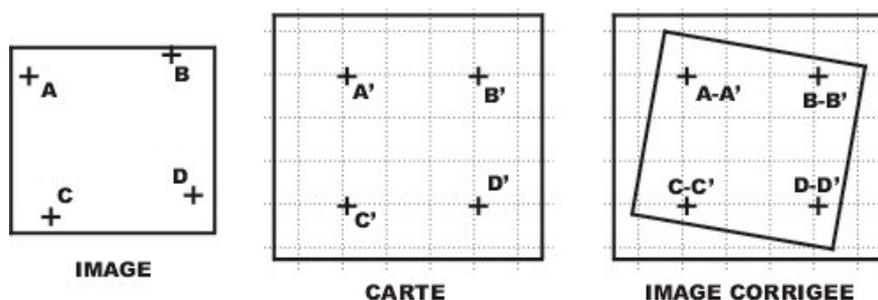


Figure 2.12. Exemple de correction géométrique d'une image (Agence spatiale canadienne)

Rehaussement des images numériques

Il peut s'avérer que l'image ne soit pas à son meilleur pour être interpréter, même avec les prétraitements radiométriques des effets de l'illumination solaire, et les corrections des conditions atmosphériques. Les images numériques nous permettent de manipuler assez facilement les valeurs enregistrées pour chaque pixel. La plupart des systèmes d'affichage des images numériques permettent de distinguer 256 niveaux d'intensité par couleur fondamentale. Une image n'utilisant qu'une plage de valeurs numériques étroite paraîtra faiblement contrastée, par contre l'image numérique exploitant totalement cette plage de valeurs, c'est-à-dire comportant des valeurs codées 0 et des valeurs codées 255, a un excellent contraste. La gamme de couleurs s'étend du blanc au noir et comprend des couleurs pleinement saturées. A cet effet, le rehaussement des images est appliqué afin de faciliter l'interprétation visuelle et la compréhension des images.

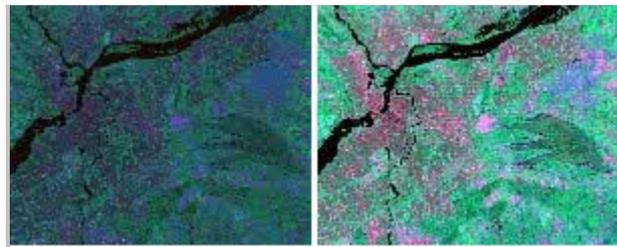


Figure 2.13. Application d'un rehaussement linéaire (Agence spatiale canadienne)

Les filtrages

Une autre méthode de traitement numérique est utilisée pour le rehaussement d'une image, c'est celle d'application des filtres spatiaux. Afin d'améliorer la lisibilité et de faciliter l'interprétation des images, les opérations de filtrages sont appliquées. En se basant sur leur fréquence spatiale, ces filtres sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques spécifiques d'une image numérique. Le principe est de modifier la valeur numérique d'un pixel en fonction des valeurs des pixels voisins. Par exemple, pour que l'image apparaisse plus floue, et les détails les plus fins disparaissent, on effectue un lissage en remplaçant la valeur de chaque pixel par la moyenne de lui-même et de ses 8 voisins. Un filtre passe-bas est utilisé pour lisser une image, il réduit les plus petits détails d'une image. Il est spécialement conçu afin de mettre en évidence les régions assez grandes et homogènes ayant des pixels d'intensité similaire (Centre Canadien de Télédétection, 2019). Les filtres passe-haut font le contraire : Ces filtres directionnels ou les filtres détectant les contours sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image comme les limites des champs ou les routes. Ils sont utilisés pour raviver les petits détails d'une image numérique.

Les compositions colorées

Le principe des compositions colorées consiste à affecter aux trois couleurs primaires, rouge, vert et bleu, trois images acquises au même moment au-dessus d'une même région, mais dans des longueurs

d'onde différentes. En fonction de l'affectation des couleurs primaires aux trois bandes spectrales, le résultat soit une composition colorée de vraies couleurs dite naturelle ou en fausses couleurs. Dans une image en vraies couleurs, les trois couleurs primaires sont affectées aux bandes spectrales acquises dans les longueurs d'onde du rouge, du vert et du bleu correspondantes. L'image résultante correspond donc exactement aux couleurs du monde réel. L'image de droite ci-dessous présente une partie de la plaine de Ghriss réalisées à partir des bandes spectrales rouge, verte et bleue du capteur Landsat8 OLI-TIRS, affichée en vraies couleurs. Si les bandes spectrales de l'image ne correspondent pas aux trois couleurs primaires, l'image qui en résulte est appelée une image en fausses couleurs, comme c'est le cas de l'image de gauche ci-dessous, ici la couleur rouge est associée à la bande proche IR, la couleur verte à la bande rouge et la couleur bleue à la bande verte (NIR, Red, Green). Par conséquent, aucune ressemblance n'existe entre la couleur de l'objet dans l'image affichée et sa couleur réelle. Pour produire des images en fausses couleurs, il existe plusieurs façons, chacune étant plus adaptée à une application particulière. Cette combinaison est très utilisée en télédétection, elle est dite infrarouge fausses couleurs, elle est particulièrement adaptée à l'étude de la végétation. Elle s'appuie sur les propriétés de la végétation qui réfléchit fortement le rayonnement proche-infrarouge. Sur la composition colorée, la végétation apparaît dans différentes teintes de rouge en fonction des espèces, et des conditions environnementales.



(a) combinaison 432

(b) combinaison 321

Figure 2.14. (a) Composition colorée Infrarouge 'fausses couleurs' réalisée à partir des bandes NIR Red Green, (b) 'vraies couleurs' Red Green Blue.

Lorsque plus de trois bandes spectrales sont disponibles sur un capteur satellitaire, ce qui est le cas pour les satellites Landsat8 et Sentinel, qui acquièrent plusieurs images simultanément dans différents longueurs d'onde, rien n'interdit de réaliser autres composition colorée que les combinaisons standards. L'affectation des couleurs à chacune des trois bandes spectrales dépend de ce que l'on souhaite mettre en évidence. Si nous nous préoccupons de la végétation, par exemple, les bandes rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge seront plus appropriées. En revanche, si l'on s'intéresse à la profondeur ou à la couleur de l'eau. La réflectance les plus élevée de cette ressource est dans le domaine du visible

que dans celui de l'infrarouge, ce qui nous conduira à utiliser de préférence les bandes bleu, vert et rouge (1/2/3).

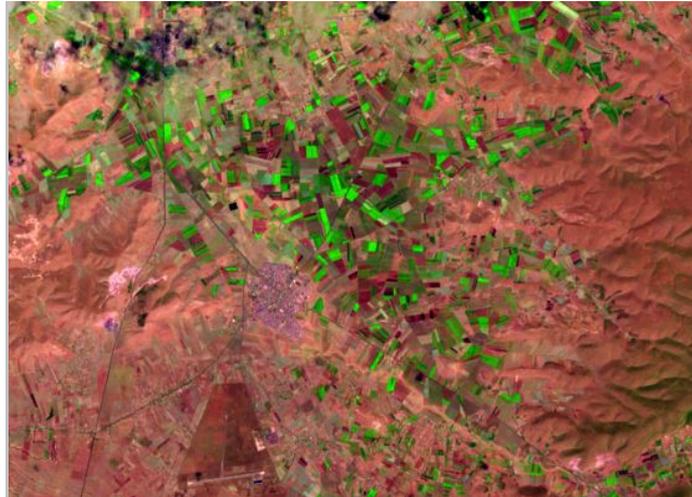


Figure 2.15. Composition colorée réalisée à partir des bandes moyenne infrarouge, proche infrarouge et rouge.

Domaines d'application de la télédétection

Pour chaque application, il existe une combinaison spécifique de résolutions spectrale, spatiale et temporelle. À la base, chaque capteur est conçu pour des applications spécifiques, les bandes spectrales acquises par un capteur optique déterminent les applications pour lesquelles il sera utile. La résolution temporelle fait référence au temps écoulé entre deux prises consécutives d'une image au dessus de la même région. Certaines applications où le temps est un facteur important nécessitent un traitement et une livraison rapides des images pour permettre aux utilisateurs d'en retirer rapidement l'information. La résolution temporelle dépend de la problématique étudiée, la surveillance de feux de forêt par exemple nécessite des images répétitives prises avec une fréquence importante. Certaines applications demandent des images saisonnières telles la surveillance de la flore. Tandis que d'autres ne demandent qu'une seule série d'images, comme la cartographie des structures géologiques.

Télédétection en hydrologie

L'hydrologie est la science qui permet l'étude de l'eau sur la Terre, qu'elle soit gelée sous forme de glace ou de neige qu'elle coule à la surface, ou qu'elle soit emprisonnée dans le sol (hydrogéologie). Cette ressource naturelle est liée à plusieurs applications de la télédétection, et représente une composante importante dans divers domaines, notamment l'utilisation du sol, l'agriculture et la foresterie. Comme la majorité des processus hydrologiques sont dynamiques, de façon saisonnière et

même quotidienne, une résolution temporelle fréquente est nécessaire. Généralement les relevés terrestres ne permettent d'offrir un aperçu synoptique de la distribution spatiale et de la dynamique des processus hydrologiques, la télédétection, et le radar particulièrement, apporte une nouvelle dimension aux études hydrologiques, ce capteur actif permet l'acquisition de données le jour, la nuit et même durant les tempêtes. Voici quelques applications de la télédétection en hydrologie : la cartographie et la modélisation des bassins hydrologiques, la surveillance et la cartographie des inondations, la détection des changements dans les rivières et les deltas, l'évaluation de l'humidité du sol, la cartographie et la surveillance des marécages, la planification des horaires d'irrigation et la détection des fuites des canaux, etc.

Cartographie et la délimitation des inondations

Les techniques de télédétection sont utilisées pour identifier et cartographier les plaines alluviales, les chenaux de rivières abandonnés et les méandres pour la planification des réseaux de transports. Elle permet d'orienter les secours de façon efficace par la fourniture des évaluations quantifiables sur l'étendue des terres et des infrastructures touchées par les inondations. Les données spatiales sont utilisées par les agences de prévision d'inondations, les urbanistes, les organismes de secours d'urgence, les compagnies hydroélectriques, les organismes de conservation et les compagnies d'assurance. L'incorporation de ces données dans un SIG permet le calcul et l'évaluation rapides des dommages, des niveaux d'eau et des régions en danger d'inondation. Les utilisateurs des données de télédétection qui travaillent dans la modélisation hydrologique, dans l'évaluation des dommages, dans la planification de moyens d'atténuation des inondations, dans les études d'étalonnage et de validation n'ont pas besoin de données en temps réel, le délai de traitement et de livraison est donc moins important par rapport aux utilisateurs qui ont besoin d'information durant la gestion de la crise. Les crues éclair sont habituellement de courte durée et surviennent généralement durant des périodes de mauvais temps; les capteurs optiques qui produisent l'information utile pour cette application ne peuvent pénétrer la couche nuageuse, et deviennent alors inutiles. Les capteurs actifs à synthèse d'ouverture RSO sont conçus spécialement pour la surveillance des inondations. RADARSAT, par exemple, offre un intervalle court entre l'acquisition des données et sa livraison au client. Les données RSO permettent de bien différencier les surfaces de terre des surfaces d'eau, ce qui facilite la cartographie rapide des limites de l'étendue des inondations, et sont encore plus utiles quand elles sont superposées à une image acquise avant l'inondation puis présentées dans un SIG contenant l'information cadastrale et les réseaux routiers.

Les études de l'humidité du sol

Dans les pays souvent menacés de la rareté des précipitations et menacés de sécheresse, l'humidité du sol reste une mesure importante pour la détermination du potentiel de production des cultures. Ce paramètre est aussi primordial dans la modélisation des bassins de drainage où l'humidité dans le sol

reflète la quantité d'eau présente dans les deux premiers mètres du sol. Dans les zones semi arides, la susceptibilité d'évaporation de l'humidité dans l'atmosphère reste élevée. La détection rapide de conditions d'assèchement, qui indique le début d'une sécheresse, permet de prévenir les producteurs agricoles et de faire des prévisions quant au volume et à la qualité des récoltes pour améliorer la production. Dans la prédiction d'inondations, l'humidité du sol est importante, car un sol saturé favorise le ruissèlement et ne peut plus absorber de pluie. Aussi dans la modélisation du drainage, elle peut fournir de l'information sur le potentiel hydroélectrique et d'irrigation d'un bassin. Dans les régions à grand risque d'érosion hydrique, les évaluations de la teneur en humidité du sol aident à la prévision des taux d'évaporation et du volume de ruissellement.

Sur de grande superficie, la télédétection permet de mesurer l'humidité du sol, contrairement aux mesures au sol qui donnent des valeurs ponctuelles. Pour cette application, le radar est plus utile que les capteurs optiques. Il reste un excellent outil pour obtenir des images qualitatives et des mesures quantitatives, car la rétrodiffusion du radar dépend de l'humidité du sol, de la rugosité de la surface, de la topographie, de la quantité et du type de couvert végétal. Si les quatre derniers paramètres demeurent inchangés, les images radars multi-temporelles peuvent démontrer le changement de la teneur en humidité du sol. L'acquisition fréquente et régulière d'images est nécessaire durant la saison de croissance, ça permet de suivre les changements dans le taux d'humidité. Pour savoir si le sol est saturé ou sec, une livraison rapide des données est requise, ça permet aux producteurs de réagir à temps pour corriger la situation. Les images à haute résolution permettent de cibler les corrections de façon plus précise, et offrent un aperçu global du sol et des conditions de croissance aux gestionnaires.

Couverture et l'utilisation du sol

Les deux termes utilisation du sol (Land use), et couverture du sol (Land cover) se ressemblent, mais ils ont des définitions très différentes. L'utilisation du sol fait référence à l'usage qu'on fait du sol. La disparition et les perturbations des terres fertiles, l'urbanisation et la détérioration des forêts sont des sujets qui stimulent le développement d'études sur de l'utilisation du sol. L'application de l'utilisation du sol comprend la cartographie de base et la surveillance qui en découle, puisque des informations adéquates sont nécessaires pour connaître quelle superficie de sol correspond à quel type d'utilisation, et pour identifier les changements d'utilisation spatio-temporelle. Ces connaissances aident au développement de stratégies visant à équilibrer les utilisations conflictuelles et les pressions de l'urbanisation.

La couverture du sol fait référence à la couverture de la surface sur le sol, que ce soit de la végétation, de l'eau, le bâti et les infrastructures, le sol nu ou autre. L'identification de la couverture du sol fournit des informations préliminaires pour les cartes thématiques, et établit la ligne de base à partir de laquelle des activités de suivi et de détection des changements peuvent être effectuées. Le tracé et la cartographie de la couverture du sol sont importants pour les études de gestion des ressources, de

planification d'activités et même de surveillance planétaire. Il est donc important de bien différencier entre l'utilisation et la couverture du sol, Les propriétés mesurées par la télédétection, et les les informations qui peuvent être en retirer, se rapportent à la couverture du sol, à partir de laquelle l'utilisation du sol peut être déduite en se basant sur des connaissances préalables. L'étude de l'utilisation et la couverture du sol est utilisée pour la planification, l'évaluation de développement et de l'activité industrielle, la surveillance, etc. La détection de changements des couvertures du sol à long terme démontre la réaction aux modifications des conditions climatiques locales et régionales, et facilite la gestion durable des terres. Voici quelques applications de la télédétection pour l'utilisation du sol:

- la cartographie de base pour des données SIG
- la gestion des ressources naturelles
- l'expansion et le développement urbains
- la protection de l'habitat sauvage
- la délimitation de l'étendue de dommage comme les inondations, les incendies, les tremblements de terre, etc.

Changements d'utilisation du sol (rural/urbain)

Afin d'assurer que l'agriculture se développe dans les endroits les plus appropriés pour éviter une dégradation due au voisinage urbain, et que le développement urbain n'empiète pas sur les terres agricoles, on analyse les changements d'utilisation du sol. La télédétection, avec les analyses multi-temporelles qu'elle permet, offre une perspective unique sur l'étalement urbain. Pour cartographier les changements d'utilisation du sol, de rurale à urbaine, l'élément clé est de distinguer entre les utilisations rurales et urbaines. Les méthodes de télédétection sont utilisées pour classifier les types d'utilisation du sol de façon pratique, économique et de manière répétitive. La cartographie des changements d'utilisation du sol exige des données de haute résolution spatiale pour obtenir des informations détaillées, et des données multi-spectrales optiques afin de distinguer entre les différentes classes d'utilisation du sol. Les détecteurs opérationnels du spectre, dans les zones visible et infrarouge, sont les sources de données les plus utiles pour l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol. En plus de l'imagerie radar qui permet la détection de plusieurs caractéristiques urbaines grâce à une grande réflectivité, les données visible et infrarouge à haute résolution permettent une distinction plus fine des classes d'utilisation et de couverture du sol, ce qui offre la possibilité d'une identification plus sûre de la banlieue urbaine et des classes de transition allant de l'urbain au rural. Les images optiques acquises pendant l'hiver sont fortement utiles délimiter les régions urbaines et non urbaines.

Rien n'est plus pratique et économique pour obtenir une perspective régionale de couverture du sol que la télédétection. Pour en assurer le suivi et la gestion, la cartographie de la couverture du sol à l'échelle régionale permet d'obtenir un inventaire des ressources du sol, Les données de télédétection permettent

de suivre la croissance des plantes au cours des saisons, tant au niveau du changement de structure, avec le radar, qu'à celui du changement du contenu de chlorophylle, discernable avec les capteurs du visible et d'infrarouge. Il ne serait pas pratique de discerner les tendances de couverture du sol avec des points comme sources de données. La cartographie régionale exige une couverture spatiale continue au-dessus de grandes régions. La télédétection satisfait cette exigence et fournit de l'information multispectrale et multi-temporelle pour une classification exacte de la couverture du sol.

La cartographie et les spatiocartes

Les éléments naturels et les infrastructures artificielles, telles les centres urbains, les réseaux de transport et les frontières administratives, peuvent être combinés à de l'information thématique. La cartographie est donc la composante intégrale du processus de gestion des ressources terrestres, et l'information qui en résulte est un produit courant de l'analyse des données de télédétection. L'intégration des cartes d'information de base thématique, en plus de l'information sur l'altimétrie, sont essentielles à la planification et la gestion des sols. Traditionnellement, l'information cartographique était obtenue au moyen de levés et de techniques photogrammétriques, cette technique exigeaient du temps, en plus elle est coûteuse. La demande croissante pour les données numériques et les capacités de production cartographique informatisée, en plus des développements de la technologie informatique, ont favorisé l'utilisation de télédétection comme source de données pour les applications cartographiques. Les spatiocartes d'occupation du sol constituent le second type le plus couramment produit, après les spatiocartes en composition colorée. Elles sont dérivées de la classification d'une ou plusieurs images satellite est sont nommées conventionnelle les cartes d'affectations du sol. les spatiocartes d'occupation du sol relèvent d'une logique et d'une méthodologie complètement différentes par rapport au composition colorée qui laisse au lecteur le soin d'interpréter l'image en fonction de ses propres centres d'intérêt, et sont élaboré en favorisant la reconnaissance et l'identification visuelle des détails. Par contre, une carte d'occupation du sol répond à un objectif déterminé a priori, depuis la sélection des images sources et le choix de l'échelle, jusqu'à la sélection des couleurs. Les méthodes de classification elles-mêmes, sont dépendantes de l'objectif étudié.

2.4 Conclusion

Le bassin versant de la Macta est un espace extrêmement complexe dont le fonctionnement et l'évolution sont conditionnés par de multiples paramètres naturels, physiques et anthropiques qui interagissent à différentes échelles spatio-temporelles. Les changements dans l'utilisation et la couverture du sol avec la pression anthropique croissante, menacent l'équilibre global du bassin. Cette situation préoccupante à l'échelle mondiale, a justifié la mise en place de programmes nationaux et internationaux relatifs à la gestion intégrée des bassins versants et à des recherches scientifiques menées dans différentes disciplines. Si on se réfère à l'expérience internationale dans ce domaine, il semble acquis que les avancées les plus révélateurs concernant la gestion intégrée des bassins versants

se sont notamment appuyées sur l'outil géomatique qui permet une gestion à l'échelle non plus d'une ou de quelques parcelles agricoles, mais à une échelle territoriale, afin de mettre en évidence les secteurs sur lesquels il est nécessaire de mettre en œuvre des actions de gestion durable. Les données de la télédétection et les systèmes d'information géographique sont des outils scientifiques et techniques, qui synthétisent l'ensemble des progrès conceptuels réalisés dans le domaine de l'information géographique et établissent un lien tangible entre les différents compartiments du système étudié. Les avancées technologiques dans l'industrie spatiale, et la mise en œuvre de nouveaux capteurs satellitaires dans le domaine optique caractérisés par une très haute résolution spatiale, permet une cartographie détaillée de l'utilisation et la couverture du sol. D'autre part, l'exploitation de lasers aéroportés de type LIDAR offre l'opportunité de restituer finement la microtopographie et le réseau hydrologique. La gestion durable d'un bassin versant implique également de disposer d'informations pertinentes et de méthodes d'analyse complémentaires. Il apparaît cependant que dans l'état actuel de leur développement, les SIG contribuent efficacement à la production d'éléments de connaissance utiles aux prises de décision des gestionnaires. Néanmoins, la mise en place de ces systèmes dont les apports à la connaissance et à la gestion environnementale est reconnue, nécessite une démarche conceptuelle rigoureuse et pose un certain nombre de questions méthodologiques.

CHAPITRE III

Présentation de la zone d'étude

3.1 Caractéristiques de la zone d'étude

3.1.1 Situation géographique

Situé au Nord-Ouest de l'Algérie, le bassin versant de la Macta s'étend sur une superficie de plus de 14000 km². Drainé par deux principaux cours d'eau, Oued El Mebtouh, à l'ouest, et Oued El Hammam à l'est. Il associe, dans sa partie nord, une basse plaine littorale qui présente une altitude inférieure à 9 m ce qui favorise la présence de plans d'eau, de marais et de steppes humides. Des massifs montagneux, celles de Tessala qui bordent le bassin dans la partie nord ouest, avec une altimétrie qui dépasse les 1050 mètres d'altitude. Au sud-ouest, le bassin est limité par les montagnes de Tlemcen (1400 m). La grande partie de la zone moyenne du bassin est occupée par les montagnes de Beni Chougrane (900 m) qui remonte jusqu'à l'Est. Le bassin est limité dans la partie sud par les montagnes de Saïda et Dhaya (1200 m, 1400 m respectivement) jusqu'aux hauteurs de la bordure septentrionale des hauts plateaux (Mohamed Meddi et al., 2009).

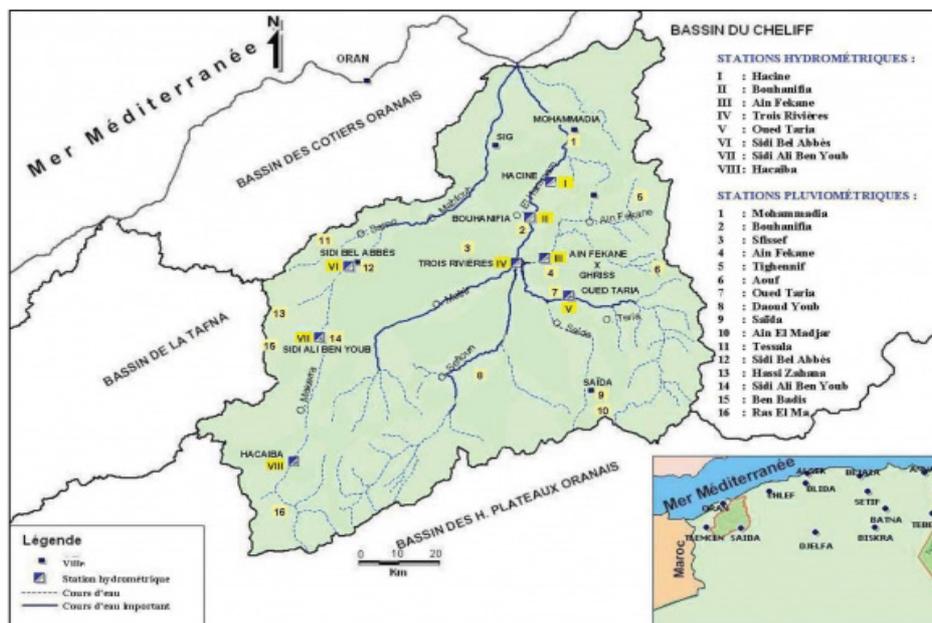


Figure 3.1. Localisation géographique du bassin versant de la Macta (Mohamed Meddi et al, 2009)

3.1.2 Relief et topographie du bassin versant

Le bassin versant de la Macta est constitué d'une part par la haute plaine de Sidi Bel Abbès, les plaines de la Habra, de Ghrisse à Mascara et d'autre part par deux dispositifs orographiques parallèles à la côte allant du Sud-Ouest au Nord-Est. Ces dispositifs sont formés essentiellement par les monts des Beni-Cheugrane dont l'altitude varie entre 540 et 900m et les monts de Telagh et de Saïda avec une altitude variant de 600 à 1200m.

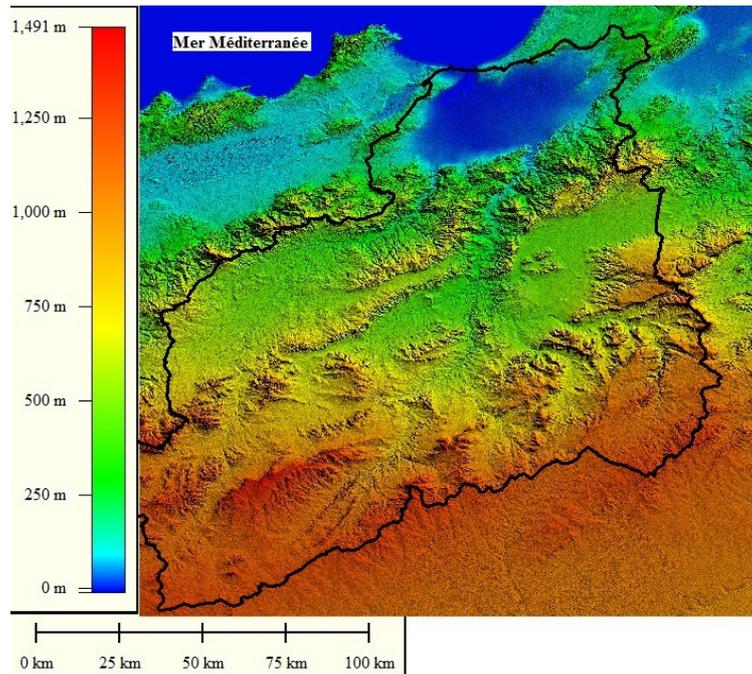


Figure 3.2. Topographie du bassin versant de la Macta.

3.1.3 La géologie

Le centre de la plaine de Sidi Bel Abbès est une cuvette à substratum Argilo-Marneux, gris et vert, daté du Miocène ou du pliocène. Les monts plissés du Tessala sont allongés du Sud-Est au Nord-Est avec une ossature crétacée et un recouvrement tertiaire très épais. Les monts de Tlemcen et de Saida sont formés en presque totalité de matériaux jurassique moyen et supérieur et crétacé inférieur et moyen. Le prolongement de Beni-Chougrane, par la série de Bouhanifia, atteint l'extrémité orientale de la plaine de Sidi Bel Abbès. Dans la vallée ; une formation prédominante d'important remblaiement argileux-sableux quaternaire (Khaldi, 2005).

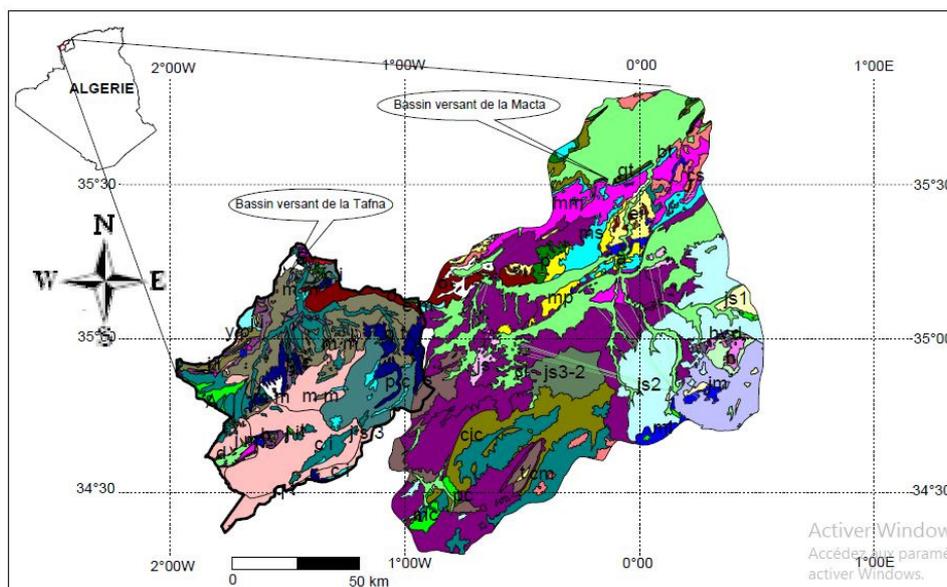


Figure 3.3. Carte Géologique des bassins versants Macta – Tafna (source : Khaldi, 2005)

3.1.4 Aspect climatologique

Le changement climatique est devenu l'un des sujets d'actualité en Algérie dès le début de ce siècle. L'impact de ces changements sur le plan socio-économique de plusieurs pays, notamment les pays du globe les moins développés au plan technique. L'économie dans ce qu'on appelle habituellement le tiers monde est fondé essentiellement sur l'agriculture, généralement non irriguée. La diminution de la ressource en eau, dans certains pays en développement, est un problème majeur qui résulte directement de phénomène de la sécheresse avec des ampleurs et des durées variables. Dans la plus grande partie de l'Afrique, la rareté de l'eau pluviale est la calamité climatique la plus fréquente. L'ouest d'Algérie, a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, depuis les années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. La plus récente a été caractérisée par son intensité, son ampleur spatiale et par son impact majeur et sensible sur la ressources hydrique (Khaldi, 2005). L'eau s'est raréfiée un peu partout et particulièrement à l'Ouest algérien. En général, le bassin de la Macta subit l'influence méditerranéenne au Nord et continentale au Sud, où le climat est sec et aride, avec des hivers froids et des étés chauds. Les précipitations annuelles dans cette région varient entre 280 mm dans la partie Sud du bassin et 350 mm dans les montagnes de Beni-Chougrane. Les années les plus humides peuvent avoir des précipitations 3 à 4 fois supérieures à celle des années les plus sèches.

3.1.5 Évolution des régimes pluviométriques

Durant les dernières décennies du XXème siècle, l'analyse de l'évolution des précipitations dans la même région et les tendances qu'on y peut détecter, sont du plus grand intérêt pour une région où la ressource hydrique constitue un des aspects clés du développement économique et de la gestion de l'environnement. Le bassin est soumis à des variations pluviométriques spatio-temporelles très irrégulières, Khaldi, dans son étude sur la variabilité pluviométrique dans le bassin versant de la Macta, a constaté que la moyenne annuelle des totaux précipités varie entre 321 mm et 566 mm, l'étude a été appliquée sur 25 stations sur une période d'observations comprise de 1930 jusqu'à 2000.

3.1.6 La population

La répartition spatiale de la population est fortement inégale, une forte disparité entre un Nord très peuplé et un Sud moins dense. Les densités enregistrées au niveau de la bande littorale, en particulier, diminuent au fur et à mesure qu'on progresse vers l'intérieur, pour atteindre des taux très bas, dans certaines zones reculées des Hautes Plaines (tableau ci-dessous). La mesure du poids démographique du littoral en Oranie, se base sur le découpage administratif communal de l'ouest Algérien. L'échelle spatiale d'analyse de la répartition de la population est la commune vue qu'elle traduit au mieux les disparités Nord-Sud en Algérie. Cette échelle permettait de dépasser les contraintes qui pouvait être posées, si le travail a été fait exclusivement à l'échelle de la wilaya (figure 3.4).

Tableau 3.1 : Répartition de la population dans l'Ouest par entités physiques (Sources : ONS, RGPH.)

Communes	Superficie (km ²)	RGPH 1987		RGPH 1998		RGPH 2008	
		Population	Densité hab/km ²	Population	Densité hab/km ²	Population	Densité hab/km ²
Littoral	3037	1 285 415	423,25	1 595 137	525,23	2 155 603	709,78
Arrière pays littoral	6670	769 381	115,34	950 921	142,56	1 183 778	117,47
Domaine tellien	32110	2 782 856	86,66	4 580 454	142,64	5 456 604	169,93
Nord de la Steppe	21460	159 948	7,45	172 796	8,05	190 983	8,89
Total	63277	4 997 600	78,97	7 299 308	115,35	8 986 968	142,02

La densité par commune littorale, appartenant aux wilayas d'Oran, de Mostaganem, de Tlemcen et de la wilaya d'Aïn Témouchent, dépasse souvent les 400 habitants / km² alors que dans la plupart des communes intérieures, notamment celles du sud, les densités restent faibles, avec moins de 100 habitants / km². Les communes de la bande littorale regroupent, à elles seules, 2 155 603 habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat pour l'année 2008, soit plus de 30 % de la population de l'Oranie sur un territoire de 3037 km² seulement, soit 4,8 % de la superficie totale de la région (Ghodbani, 2013). Compte aux communes des wilayas de Mascara, de Tiaret, de Saïda et de Sidi Bel Abbès et de la partie hors domaine littoral de la wilaya de Tlemcen, ces zones regroupent 3 916 584 habitants, soit une densité d'environ 72 hab/km². Un centre composé d'un ensemble de communes à forte densité se détache dans le domaine tellien. Situé entre la zone littorale et sub-littorale, au nord et la zone steppique, au sud. Il s'agit des communes chefs-lieux des wilayas de Mascara, de Sidi Bel Abbès, de Tlemcen et de Relizane. La densité dans la partie littorale est diffusée sur le territoire situé sur l'axe Oran – Arzew – Mostaganem. Contrairement, dans les parties intérieures, cette densité reste néanmoins très localisée autour des centres des agglomérations urbaines. Cette disparité due à la combinaison de plusieurs facteurs semble se maintenir à travers les trois derniers recensements (Ghodbani, 2013).

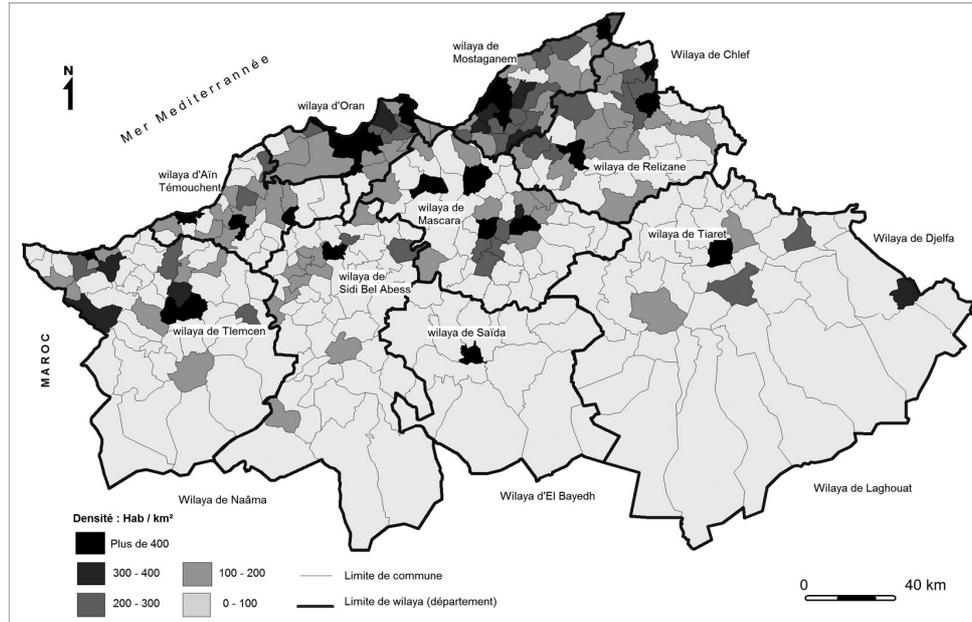


Figure 3.4. La répartition spatiale de la densité de population par commune en 2008 (Source : Ghodbani. T et al, 2013)

3.2 Géographie de la population dans l'Ouest Algérien

La répartition de population dans l'espace par rapport au milieu naturel et aux grandes entités physiques est globalement corrélée. Les fortes densités, au nord, se trouvent dans les plaines littorales de Bousfer, les Andalouses et de Mostaganem et au niveau des espaces sublittoraux de Mleta, Tlélat, et la Mina. Les zones de montagne et de steppe sont faiblement occupées par rapport aux zones de plaines et de plateaux qui sont les plus densément peuplées (Ghodbani, 2013). Les plaines littorales et sub-littorales regroupent les terrains les plus appropriés à l'occupation humaine, avec une faible précipitation variant entre 300 à 400 mm/an et une faible amplitude thermique, due à la présence de la mer. Les plaines dans les zones intérieures ont également une forte densité, quoique situées à des altitudes plus élevées que celles du littoral entre 450 et 800 m. D'ouest en est, on trouve les plaines de Maghnia, de Tlemcen, de Mekkerra et de Ghriss. L'activité agricole est dominante dans ces plaines due à la densité du réseau hydrographique et les plus grands barrages de la région ouest y ont été édifiés (Ouzert, Bouhanifia, Frgoug, Chorfa, Béni Bahdel, Mefrouch, Sarno, Gargar, etc.). Les zones montagneuses restent les plus faiblement peuplées, elles sont connues pour être des espaces déshérités et réputées répulsives dans plusieurs endroits. Ces zones enregistrent souvent des taux négatifs des soldes migratoires, contrairement aux plaines et plateaux dont les valeurs restent souvent positives. Ces disparités ne se limitent pas aux zones montagneuses, car les hautes plaines steppiques sont aussi concernées par le faible peuplement. Mises à part les communes des quatre chefs-lieux des wilayas de Mascara, Sidi bel Abbes, Saïda et de Tlemcen, plus de 120 communes affichent de faibles densités, d'environ 100 habitants/km².

Dans les steppes l'économie pastorale est dominante, les amplitudes thermiques dont plus importantes et les précipitations ne dépassent guère les 300 mm/an. S'ajoute à ces conditions naturelles difficiles, la fragilité naturelle des écosystèmes, accentuée par les activités anthropiques et le changement climatique. Les éléments naturels ne sauraient expliquer à eux seuls de telles disparités entre le Nord et le Sud. Revenant à la période coloniale, il est en effet reconnu que le développement d'une économie extravertie était à l'origine de la répartition inégale dans l'ouest algérien. Evidemment, le poids économique et démographique de l'ouest algérien a commencé à prendre de l'importance dès le début du vingtième siècle. Les villes portuaires à rayonnement régional, particulièrement Oran, Ghazaouet, Béni-Saf et Mostaganem tiraient profit des centres intermédiaires de l'arrière-pays ; qu'ils soient de création ancienne, comme Mascara, Tlemcen ou récents, comme Sidi Bel Abbès ou Relizane. Ce sont ces villes intérieures qui étaient dynamisées durant l'époque coloniale pour la mise en valeur agricole (Ghodbani, 2013).

3.2.1 Promotion administrative et délibération du développement industriel

Après l'indépendance, le régime économique socialiste a instauré une politique volontariste d'industrialisation, en concédant d'importants investissements pour la construction d'infrastructures particulièrement dans les villes côtières. Dans l'Ouest algérien, parmi les conséquences directes de cette politique, la mise en place d'une industrie pétrochimique à Arzew, Béthioua et de transformation à Oran, Ghazaouet et Mostaganem, ce qui a entraîné une exacerbation de la polarisation des villes côtières (Semmoud, 1986). Cette politique a coïncidé avec la promotion administrative de nouvelles agglomérations au rang de wilaya lors des découpages territoriaux successifs. En plus de l'évolution démographique importante, les effets de ces politiques ont renforcé le rôle des pôles littoraux d'une part, et ont contribué à faire émerger de nouveaux pôles industriels régionaux, de l'intérieur d'autre part, comme ceux de Sidi Bel Abbès et Tlemcen. Comme conséquence directe sur l'espace, ces effets se traduisaient par un recul remarquable des disparités entre le littoral et l'intérieur. Cette politique de rééquilibrage a touché fortement la partie tellienne, tandis que les zones steppiques et sahariennes étant très peu intégrées dans le processus de développement industriel (Ghodbani, 2013).

3.2.2 L'impact de l'insécurité et des conflits internes

L'état Algérien, et depuis la crise économique de 1986, à entamer des réajustements structurels, sous les directives du Fonds monétaire international et de la Banque mondiale. Les villes littorales recevaient, 04 ans après, de vagues continues d'exode rural suite à l'instabilité causée par des conflits internes. Durant la décennie noire, les grandes villes de l'Ouest recevaient une masse importante de population fuyant les zones internes insécurisées. Ces villes ont subi le problème d'habitat illicite sur les périphériques, la majorité de population s'installait dans les bidonvilles et causait la problématique de pression sur le littoral et un déséquilibre régional. Une nouvelle politique d'aménagement voyait le jour parallèlement, dont le but était de faire face à l'exploitation anarchique du terrain, et de proposer

de nouveaux outils d'aménagement. Le dispositif mis en place en 1988, articulait principalement deux instruments, le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT) et les Schémas Régionaux d'Aménagement du Territoire (SRAT), et orientait le rééquilibrage du territoire national. Il a été complété par des Schémas Locaux et Sectoriels pour définir les besoins d'infrastructures de base et les équipements (MATE, 1995). En plus des programmes de gestion spécifique, permettant le développement de différents secteurs économiques.

La difficulté de la mise en œuvre de ces instruments revenait principalement à la faiblesse des ressources financières, pour couvrir les dépenses relatives à la réalisation des projets programmés, à la non coopérations inter wilayas, nécessaires pour la réussite des grands projets, aussi à la situation d'instabilité politico-économique et l'incompatibilité des moyens techniques disponibles avec les projets modernes et hautement innovants envisagés en matière d'intégration urbaine. La réalisation et le suivi de plusieurs projets ont été annulés, la politique des nouvelles villes, structurantes dynamiques et économiquement indépendantes, ne fut jamais appliquée, par manque de moyens techniques et financiers.

3.2.3 Relance économique

Au début des années 2000, avec la stabilité sécuritaire et l'amélioration des conditions économiques, divers programmes de développement ont été relancés, utilisant différentes formes d'aide à l'investissement, l'objectif était de rattraper les retards en matière de développement. Le rythme intense de réalisation de ces projets, que ce soit au plan national ou régional, ne faisait en réalité que renforcer le poids d'artificialisation des sols, et la dégradation de l'écosystème déjà fragilisés. Les multiples programmes engagés telles l'habitat collectif, les transferts d'eau régionaux, l'autoroute est-ouest et les implantations de nouvelles zones industrielles, semblent être lancés sans véritable coordination entre les différents acteurs d'aménagement, et sont conduits d'une manière sectorielle et non intégrée. Les anomalies dans la concrétisation des projets reflètent le manque de planification à l'échelle régionale (Ghodbani, 2013).

En parallèle, la conscience relative aux menaces sur l'environnement et les exigences de durabilité ont commencés à se développer. Un courant mondial revendiquait la protection de la nature était derrière cette prise de conscience tardive, une grande importance à été accordée à la préservation des bassins versants. En Algérie, un département ministériel chargé de coordonner les actions d'aménagement du territoire tout en respectant les impératifs de protection de l'environnement, a été mis en place dans ce contexte. Le ministère a initié multiples actions pour la mise en réserve naturelle de plusieurs sites à grande valeur écologique. Néanmoins, il existe toujours un décalage par rapport aux enjeux de la dynamique du changement dans l'utilisation des sols, de son impact sur l'environnement et son effet à l'échelle locale.

3.2.4 Inégalités dans l'accès aux ressources

Le complexe de marais littoral, inclus dans le bassin de la Macta, classé en tant que zone humide Ramsar en 2002 subit une pression anthropique exponentielle qui menace son équilibre naturel. Le partage de ses ressources est souvent inégal entre ses acteurs. Les Gueblis, une population nomade solidaire par son appartenance aux mêmes origines géographiques des hautes plaines intérieures de l'Oranie et ses liens de famille, sont attirés par la variété du couvert végétal halophile du bassin, pour la pratique de l'élevage ovin. Un nombre important d'eux s'installent autour des marais en solidifiant leurs tentes et les enclos par les tôles et la construction de murs en briques, ou en s'intégrant directement dans les programmes de relogement rural. Ils tirent leur poids économique par leur maintien d'un cheptel qui dépasse les 25 000 têtes qui alimente, en viande rouge, la grande partie du marché régional (Ghodbani, 2013).

Le pacage illicite dans le périmètre intégral de la réserve naturelle et le surpâturage, qui prend de l'ampleur, depuis les années quatre-vingt-dix, autour des marais et sont à l'origine des conflits entre la direction des forêts qui se charge de la protection et les Gueblis d'une part, et entre les agriculteurs locaux autour de l'exploitation des terres naturelles domaniales et les Gueblis d'autre part. Ces terres en litige devaient être protégées et mises en défends par les services concernés dans le cadre du programme Ramsar. Face à la pression des agriculteurs locaux, les responsables élus sont forcés de maintenir des accords qui concilient paysans et Gueblis, ils sont également convaincus que l'exploitation des ressources naturelles de la Macta favorisera à court terme le développement économique de leurs communes rurales. Ces arrangements ne se déroulent pas dans un climat amical, souvent des affrontements sont déclenchés entre agriculteurs locaux et nomades qui les considèrent des intrus. Dans ce climat de conflits et de rapports d'intérêt, la préservation des terres du grand bassin de la Macta paraît compliquée.

3.2.5 Les impacts sur les pratiques et la dégradation de l'environnement

Les deux dernières décennies, la pression anthropique sur l'exploitation des ressources s'est accentuée dans le bassin généralement et dans ses zones humides particulièrement, la multiplication des sources de pollution est devenue l'un des facteurs du déséquilibre environnemental de l'écosystème de la Macta. Le risque de pollution est multiplié par les substances chimiques d'origine agricole et urbaine, transportées par le réseau hydrographique qui draine les eaux usées de villes intérieures de Mascara et Sidi-Bel-Abbès. La pollution générée par l'utilisation de pesticides dans l'agriculture et de potassium dans la conservation des olives à Sig, ainsi que par le rejet dans la nature d'eaux usées industrielles non traitées aggravent la situation. Le nombre élevé de petits lacs et de cours d'eau montre une eutrophisation avancée liée directement aux rejets d'eaux usées domestiques et agricoles, riches en matière organique, dans le réseau hydrographique. L'asphyxie graduelle du milieu aquatique est le résultat direct. Les décharges sauvages, un autre point non moins important, recevant tous types de

déchets solides industriels et hospitaliers, contribue à la pollution des eaux superficielles et souterraines. Les Services d'Hygiène Communaux dans cette zone montrent que les plaines de l'Habra, la Macta et de Sig regroupent un total de 25 décharges dont 8 sauvages et 7 autorisées mais non contrôlées. Sans tri ou traitement préalables, les sites reçoivent tous les types de déchets qui ont des conséquences irréversibles sur le milieu naturel de la Macta si des mesures ne sont pas prises. La réalisation des divers projets ignore l'impact préalable sur le bassin, la densification du réseau routier, à titre d'exemple, ne prend pas en considération le caractère écologique du milieu, la réalisation d'un tronçon d'autoroute reliant Mascara à Oran, inscrit dans le grand projet de l'autoroute est-ouest est un exemple frappant. Ce chantier d'envergure est certainement vital mais il entraînera dans l'avenir une forte fréquentation, et dynamisera probablement l'urbanisation tout au long des deux axes du projet, ce qui rendra plus compliquée la préservation du milieu naturel (Ghodbani, 2013).

3.3 Conclusion

Les impacts anthropiques dans le grand bassin versant de la Macta ; changement dans l'utilisation des sols, modification du tracé naturel du réseau hydrographique, modification de la température de surface à l'échelle local, sont de plus en plus lourds et représentent le facteur principal de la dégradation de son écosystème. Une révision des plans d'urbanisme conçus pour les agglomérations du bassin, devra être réalisée pour plus de durabilité dans les actions de protection. La protection durable du bassin n'est pas chose facile, mais elle est toujours possible si elle utilise des instruments mieux adaptés aux enjeux réels, si elle intègre tous les acteurs concernés par la gestion du territoire et si elle prend en charge les interactions entre les activités anthropiques, et l'intégralité du milieu naturel.

CHAPITRE IV

Suivi spatio-temporel de l'urbanisation, estimation de la température de surface et caractérisation des ilots de chaleur urbains par télédétection.

4.1 Introduction

La croissance urbaine est un phénomène mondial observé sur tous les continents, concerne à la fois les pays développés et les pays en développement. L'Algérie, avec une population résidente totale qui dépasse 42,2 millions d'habitants, n'empêche pas à une croissance considérable du taux d'urbanisation. D'après le dernier recensement économique de l'Office National des Statistiques (ONS), sur les 934250 entités économiques recensées, 83,6% sont implantées en milieu urbain et 16,4% en milieu rural. Cette croissance urbaine ne s'est pas effectuée de manière homogène sur l'ensemble du territoire algérien, vu que plus de deux tiers de la population résident dans la région Nord du pays, majoritairement concentrée à moins de 250 km du littoral méditerranéen. En près de 42 ans (1975-2017), le taux d'urbanisation du territoire national est passé de 40,33 % à 71,86%.

L'augmentation exponentielle de la population imposera de grandes exigences aux ressources et aux terres pour des utilisations agricoles, urbaines et industrielles, ce qui entraînera des problèmes environnementaux de grande ampleur. L'étalement urbain s'effectue au détriment des terres agricoles, fragmente les espaces naturels par le bâti et les nouvelles infrastructures, et impact la biodiversité.

Durant la décennie 1990, bien qu'un ralentissement de la pression démographique ait été enregistré, le processus d'urbanisation a été accentué par l'exode rural amplifié par la situation sécuritaire vécue. Après les années 2000, et afin d'améliorer la production agricole locale, les décideurs ont encouragé le retour des agriculteurs, l'état a fournis des aides et visait le regroupement d'exploitations agricoles, ce qui a multiplié le nombre des fermes et des constructions. Les agglomérations urbaines s'étalent démesurément à cause de la consommation d'importantes surfaces de terrains urbanisables et agricoles.

Face au développement économique des territoires, aux changements d'occupation et d'usage des sols, les paysages évoluent et se modifient, entraînant un phénomène de morcellement de l'espace (Julie Betbeder, 2015). La littérature aborde le phénomène de l'étalement urbain à travers une multitude de définitions et de termes qui décrivent un même processus. Toutefois, il n'existe aucune définition universelle et complète de la notion d'étalement urbain (Wilson et al., 2003). Le phénomène d'étalement urbain est difficile à être appréhender. D'ailleurs, les termes qui désignent les nouveaux espaces urbanisés se sont multiplié : « ...*espace suburbain, périurbain ou rurban, suburbia, exurbia, ville diffuse, ville éparpillée, ville émergente, exopolis, edge-cities, boomburbs, new burbs, superburbs, et beaucoup d'autres néologismes sont apparus* » (Allain, 2004). Malgré la complexité du phénomène et la multiplicité des termes utilisés pour désigner les espaces qu'il transforme, l'analyse de quelques définitions permet d'en dégager les principales caractéristiques qui semblent universelles. L'étalement urbain est la progression des surfaces urbanisées sur la périphérie des villes de façon plus rapide que la croissance démographique (Guillaume Sainteny, 2008). D'après Peiser (2001), le terme étalement urbain, « *urban sprawl* » en anglais, signifie une « *utilisation gourmande et inefficace de*

l'espace et un développement monotone, ininterrompu et discontinu à saute-mouton ». Squires (2002) définit l'étalement urbain comme étant « *un modèle de croissance urbaine et métropolitaine qui reflète une faible densité, une dépendance automobile et un nouveau développement des zones à la frange, souvent aux alentours de la ville* ». L'étalement urbain est caractérisé par un développement discontinu et une faible densité d'utilisation de l'espace en périphérie des villes.

(Rahim aguejdad, 2009) a simplifié, lors de son étude sur l'impact de l'étalement urbain sur la biodiversité appliqué à Rennes Métropole, cinq types d'étalement urbain (**figure 4.1**)

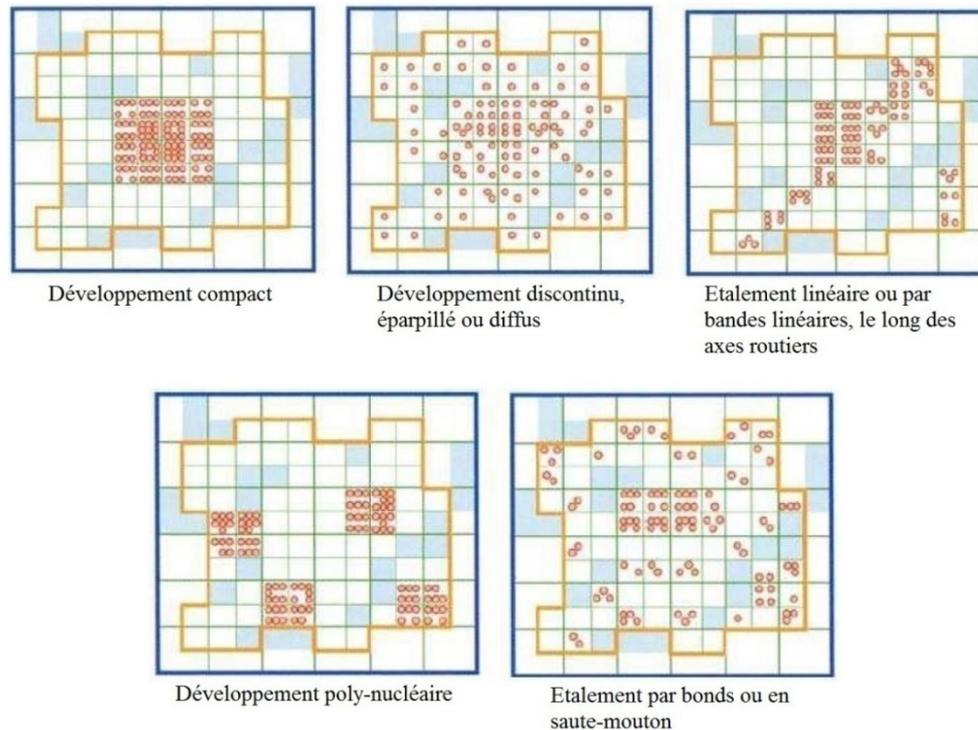


Figure 4.1. Formes de l'étalement urbain (source : Galster et al., 2001. Batty et al., 2003 in Rahim aguejdad, 2009)

L'étalement urbain présente une forme pavillonnaire d'après Antoni (2003) « *...est un processus d'urbanisation particulier, qui conduit à un arrangement de l'espace urbain privilégiant une expansion des périphéries moins denses que le centre des villes souvent sous forme pavillonnaire* ». Selon le rapport présenté par l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), "L'étalement urbain en Europe - un défi environnemental ignoré" l'étalement urbain « *se manifeste ou se caractérise par l'apparition et le développement de zones résidentielles discontinues, dispersées, à faible densité, à l'intérieur de zones à finalité agricole situées autour et à proximité des villes "mitage"* » (EEA, 2006). Il s'agit donc d'une forme de croissance urbaine, non aménagée, non planifiée, qui s'effectue selon une occupation anarchique de l'espace (Rahim aguejdad, 2009). Torrens (2008), en décrivant l'étalement urbain, souligne que c'est une conversion rural-urbain. L'étalement urbain se traduit par l'avancée de l'urbain sur le territoire rural, donc par l'artificialisation des sols, avec des conséquences

sur l'environnement, le paysage, et l'organisation des territoires. La périurbanisation désigne le processus de conversion des espaces ruraux en surfaces urbaines, par extension des agglomérations urbaines dans leur périphérie (**Lionel Rougé, 2018**). L'étalement urbain associé à la périurbanisation ont fait l'objet de nombreuses critiques environnementales: la réduction des surfaces naturelles, l'artificialisation des sols qui entraîne un mauvais écoulement des eaux de surface, la pollution de l'air et l'augmentation de la température de surface par les mobilités automobiles génératrices de gaz à effet de serre.

La ville s'étale sur ses marges de manière discontinue en produisant des territoires plus fragmentés, les aires urbaines, composées d'un pôle urbain et d'une couronne périurbaine, répondent au souci d'identifier plus strictement l'espace à dominante urbaine (Marianne Guérois et al., 2002)

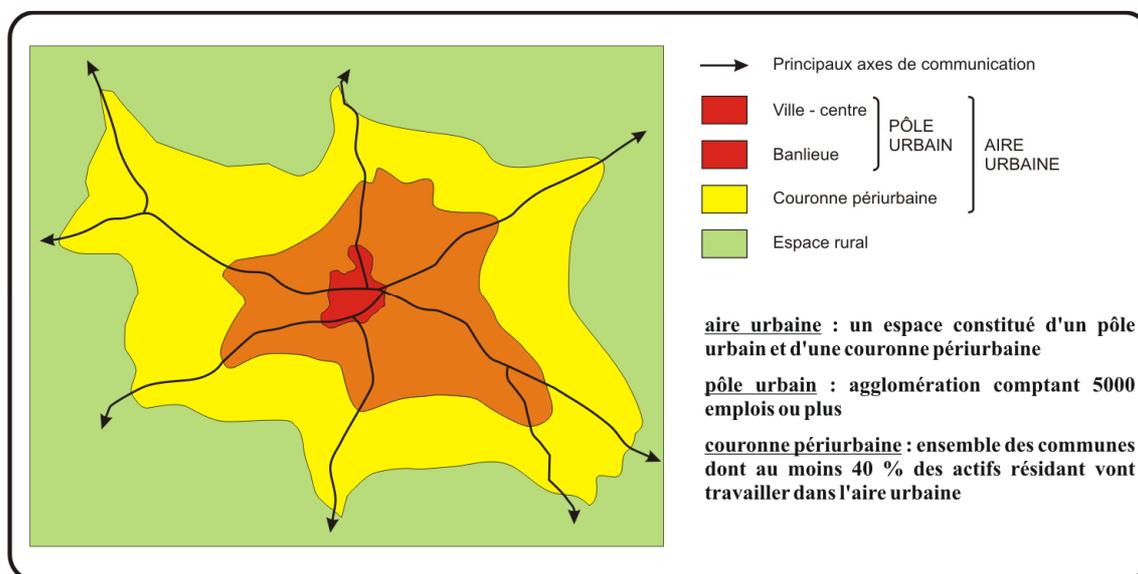


Figure 4.2. Les aires urbaines, (*Atelier d'HG Sempai, 2012*)

4.2 Zone d'étude

Le grand bassin versant de la Macta est formé de seize sous-bassins, cette vaste superficie englobe de larges plaines alluviales situées entre les massifs montagneux, dans le présent travail, le sous-bassin versant d'Oued Fekan (figure 4.3) est choisi comme notre zone d'étude vu que :

- la plaine de Ghriss d'une superficie de 72000 Hectares de terrains à vocation agricole, est entièrement inclus (figure 4.3), elle se trouve soumise à aux influences climatiques méditerranéennes.
- le phénomène d'urbanisation exercé sur la plaine et la perte des terrains fertiles à un taux alarmant, artificialisation des sols par l'implantation de nouvelles zones industrielles.
- L'anthropisation du réseau hydrographique dense par les nouvelles constructions, et l'aménagement de ses cours d'eau qui traversent la plaine.

- l'extension des routes nationales, des voies communales, le projet d'autoroute reliant Mascara et Saida, en traversant la plaine de Ghriss.
- les inondations de plus en plus fréquentes durant la dernière décennie.

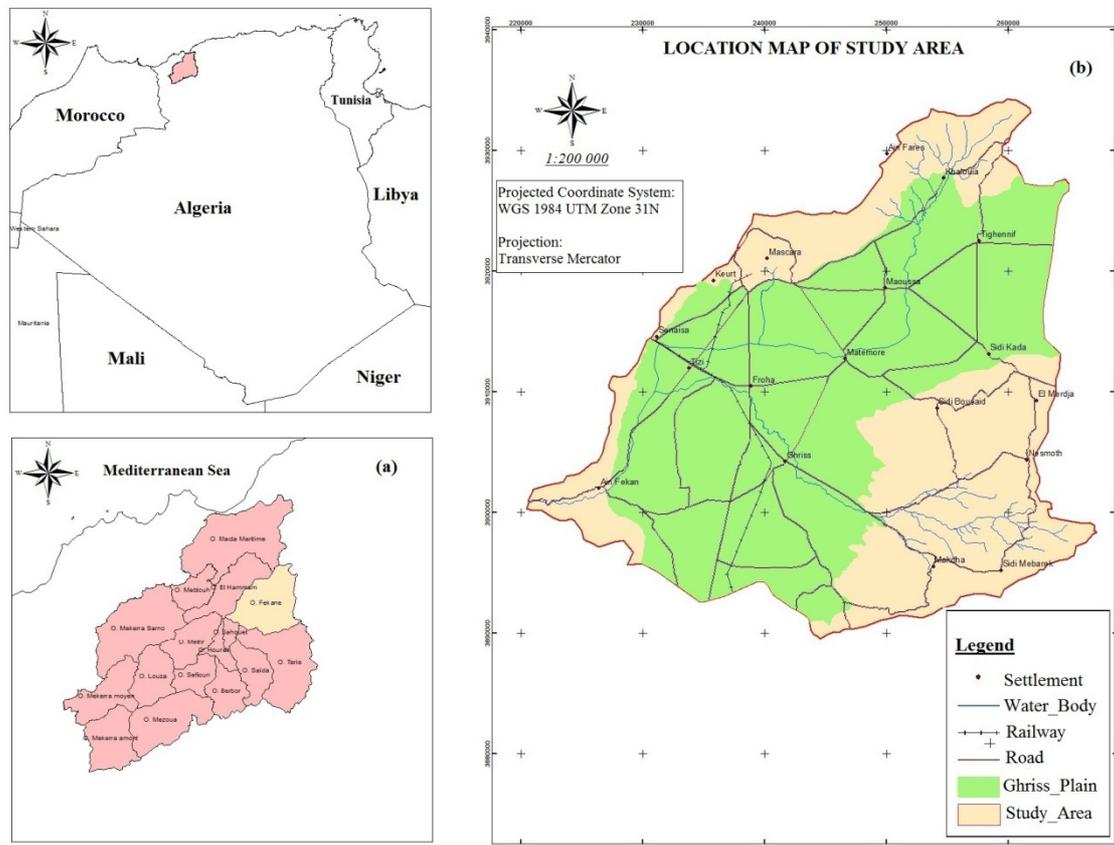


Figure 4.3. La zone d'étude (a) Sous-bassins versants de la Macta, (b) Sous-bassin versant d'Oued Fekan

4.3 Le suivi et la mesure des surfaces urbanisées

4.3.1 Introduction

La mesure de l'extension des surfaces artificialisées et la régression des surfaces agricoles reste une tâche primordiale, l'absence d'une base de donnée géographique nationale qui permet de suivre l'évolution de l'occupation des sols et de quantifier précisément l'extension de l'urbanisation, nous a imposés de chercher des méthodes pratiques qui permettent de détecter les changements dans l'utilisation et la couverture des sols. Il est possible d'obtenir des informations sur l'environnement à des échelles spatiales et temporelles fines avec l'apparition des données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale (THRS). Ce type de données permet en effet de fournir des informations sur l'occupation et l'utilisation des sols (Kerr and Ostrovsky 2003). La difficulté lors de l'évaluation de l'urbanisation réside dans les données utilisées qui peuvent être issues de sources différentes, les

approches, les méthodes de traitements et les niveaux de détection varient également, la précision spatiale et sémantique diffèrent aussi (Rahim aguejdad, 2009).

Plusieurs recherches récentes utilisant la télédétection pour aborder la problématique de l'analyse et la mesure de l'étalement urbain, suivant qu'il s'agit d'articles de méthodologie, de caractérisation, de modélisation-simulation prospective où rétrospective, les principales préoccupations portaient sur l'analyse d'impacts environnementaux de ce phénomène. Les données et la dimension méthodologique nécessaire à la caractérisation et au suivi de l'étalement urbain apparaissent cruciales (Moïse Tsayem Demaze, 2010). Une recherche bibliographique en télédétection de l'étalement urbain a été effectuée, lors de mon stage, à la Maison de la Télédétection à Montpellier le mois de Mai 2018. L'objectif initial était de faire un état de l'art, et d'avoir un aperçu aussi complet que possible sur les données utilisées et les méthodes de classification pour extraire le tissu urbain. Diverses données de télédétection sont utilisées. Les images satellites à moyenne et basse résolution spatiale où satellite large champ (NOAA AVHRR, EOS MODIS, SPOT VEGETATION, MSG SEVIRI). Les images satellites à très haute résolution spatiale qui apportent des informations géographiques extrêmement détaillées (Pleiades, Spot 6/7, PlanetSAT, Ikonos, Quickbird, WorldView). Imagerie hyperspectrale (HYPERION, CHRIS, MIVIS). Les photographies aériennes, les images radar, les données de télédétection infrarouge thermique, les images acquises du satellite Sentinelle et la prédominance des images Landsat. Pour l'extraction du bâti, de grande variété de techniques sont utilisées pour évaluer ou mesurer les espaces occupés par les surfaces artificialisées à partir d'images satellitaires. Le traitement automatique ou semi-automatique des images de télédétection par des approches supervisées, a été utilisé depuis plusieurs années pour évaluer l'étalement urbain et quantifier les surfaces artificialisées. Cela nécessite d'une part des images de télédétection à moyenne ou haute résolution et d'autre part des données de référence pour valider les résultats. (Rahim aguejdad, 2009).

Il existe de nombreuses méthodes pour le suivi et la détection des changements des utilisations et occupations du sol par imagerie satellitale en milieu périurbain. La comparaison image par image, la comparaison post-classification comme l'analyse de la différence, la soustraction où la régression entre deux images. La comparaison à partir des indices de végétation NDVI. L'analyse en composantes principales (ACP). L'analyse des vecteurs de changement. La classification numérique des images utilisant l'information spectrale manuelle (supervisée) où automatique (non-supervisée). Ces méthodes ont un succès limité dans la classification de certaines catégories de l'occupation du sol, tel l'urbain, qui nécessite d'information spatiale additionnelle (Benz et al., 2004). Les études portant sur l'extraction du tissu urbain à partir de données de télédétection sont menées, dans la plupart des cas, selon des approches basées sur les pixels, en ne considérant que l'information spectrale. L'affectation des pixels à une classe donnée selon leur signature spectrale entraîne des erreurs de classification (Hubert-Moy et al., 2008). La limite de la classification basée sur le contenu spectral des

pixels réside dans la difficulté de différencier des catégories d'occupation du sol ayant des signatures spectrales proches, tel que le bâti et le sol nu.

Plus récemment la classification orientées-objet ne traite plus le pixel de manière isolée mais des groupes de pixels (objets) dans leur contexte à différentes échelles de perceptions du paysage. L'interprète peut se baser non seulement sur les valeurs spectrales mais aussi sur des paramètres morphologiques tels que la taille, la forme et le voisinage des objets, ce qui améliore considérablement la qualité de l'information extraite. Plusieurs auteurs ont montré que cette approche donne de meilleures cartographies des objets urbains (Yuan and Bauer 2003 ; Yu et al. 2006 ; Bhaskaran et al. 2010). Dans toute les approches et techniques utilisées, les données doivent être prétraité et corriger radiométriquement et géométriquement. L'objectif est de quantifier l'étalement urbain avec une précision élevée, face à la diversité des approches et méthodes existantes se pose le problème du choix, le facteur le plus influent était la complexité du milieu étudié et le type d'étalement urbain exercé dans la plaine : une urbanisation dispersée, discontinue, éparpillée, absence totale des plans d'urbanisme et d'aménagements, un étalement anarchique des espaces urbains et une colonisation spontanée des terres agricoles.



Figure 4.4. Extrait de l'étalement urbain au centre de la plaine de Ghriss (2018).

Le présent travail tente à travers la classification orientée objet, expérimentée sur un extrait d'image Sentinelle d'une résolution spatiale de dix mètres, d'évaluer l'apport de cette approche sur l'extraction du tissu urbain de bassin versant d'Oued Fekan sous le logiciel eCognition. Il est crucial d'obtenir la meilleure adéquation possible entre la résolution de l'image et la dimension des objets que l'on souhaite détecter (Girard et al., 2010). Dans notre cas d'étude, les constructions et les bâtis ont une

superficie supérieure à celle d'un pixel de l'image sentinelle utilisée, donc la résolution spatiale choisie est acceptable. Par contre, les images Landsat 8 d'une résolution spatiale de trente mètres ne peuvent être utiles puisque la superficie de la quasi-totalité de bâti est inférieure à 900 m² (la superficie d'un pixel d'une image Landsat), ce qui entraîne de mauvaise classification et donne des résultats erronés en termes de superficie de la tache urbaine. La classification basée sur une approche orientée objet comporte une phase de segmentation qui précède la phase de classification, la segmentation doit être effectuée à différents niveaux scalaires pour que les objets d'intérêt puissent être correctement extraits puis classés (Blaschke et al., 2001 ; Lhomme et al., 2004). Le logiciel eCognition propose différents algorithmes de segmentation. Cette dernière consiste à fusionner les pixels avec leurs voisins pour créer des objets de plus en plus grands en respectant un seuil d'homogénéité. La segmentation exige des paramètres que l'utilisateur doit définir telles que l'échelle de segmentation, le poids de la bande spectrale, les ratios de couleur/forme et de compacité/lissage des objets (Benz et al., 2004). Le résultat final de l'analyse de l'image dépend grandement de la qualité de la segmentation (Dey et al., 2010).

Le critère d'échelle permet de déterminer la taille des objets, plus ce paramètre est élevé plus les objets sont grands. La segmentation multi-résolution a été privilégiée, elle permet l'utilisation de données de source et de types diverses ainsi qu'une analyse multi-échelle et une prise en compte des dépendances hiérarchiques entre les niveaux de segmentation (Benz et al., 2004). Le logiciel eCognition est accessible et facile à utiliser même pour des utilisateurs qui ne maîtrisent pas des outils de programmation, mais il est important d'établir une procédure de segmentation efficace avant la phase de classification qui, sur eCognition, est réalisée par la fonction d'appartenance définie par l'utilisateur (Thi-Thanh-Hiên Pham et al., 2013). Les objets sont ensuite discriminés par la formulation d'un certain nombre de règles issues de l'observation et des connaissances du télédéacteur, chaque objet est décrit par des attributs liés à sa réponse radiométrique, géométrique ou à son contexte. L'implémentation de ces attributs se fait à partir de seuils ou de logique floue (Christophe Revillon, 2012).

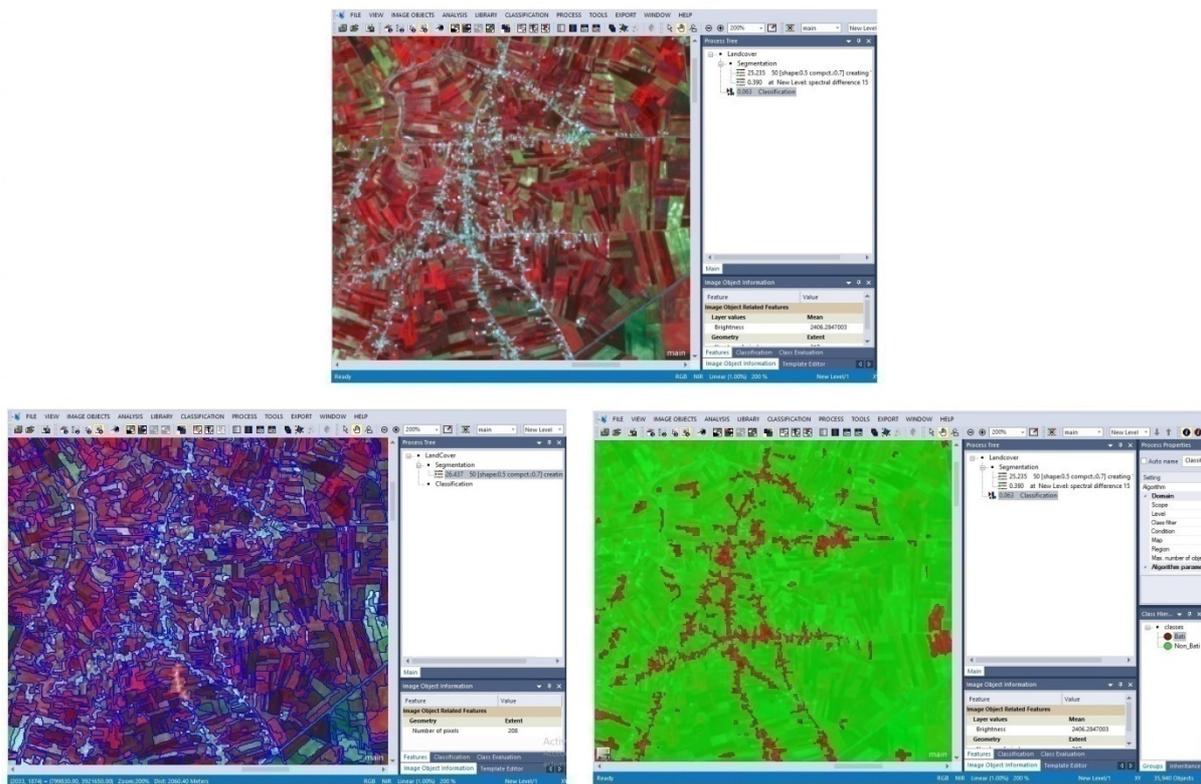


Figure 4.5. Extraction du bâti sous ECognition.

La non disponibilité des images de très haute résolution spatiale qui couvrent la totalité de notre zone d'étude, et la faible résolution spatiale et spectrale de l'image Sentinelle utilisée explique pourquoi le bâti ne peut être quantifié avec exactitude même en appliquant la classification orientée objet. C'est le cas notamment pour les confusions entre le sol nu et le sol artificialisé. Aussi l'absence des images Sentinelles d'une bonne résolution spatiale d'une date récente, ne permet pas une étude rétrospective pour étudier le phénomène d'étalement urbain et quantifier les superficies artificialisées. Ça explique le recours à la numérisation manuelle des surfaces artificialisées par photo-interprétation, à deux dates différentes, qui reste la technique la plus précise pour pouvoir déterminer précisément les dynamiques et processus d'évolution de l'urbanisation de façon quantifiée. Cette phase est réalisée sur un Système d'Information Géographique open source QGIS.



Figure 4.6. La plaine de Ghriiss sous influence urbaine

La zone présentée dans la figure ci-dessus, situé dans la partie sud de la ville de Mascara, est d'une superficie égale à 200 Hectares, les constructions de l'année 2008 représentent une superficie de 45 Hectares, un pourcentage de 22,5 % de la superficie totale, une vectorisation sur une image plus récente (de l'année 2018) nous a permis le calcul de superficie des nouvelles constructions.



Figure 4.7. Digitalisation de l'espace bâti. Terrain urbanisé de 2008 à 2018 (rouge)

Le nombre des nouvelles constructions est de 173 ilots, occupent une superficie de plus de quatre 04 Hectares, cette quantité du béton carie les terres agricoles et explique clairement le taux d'urbanisation exercé dans la plaine.

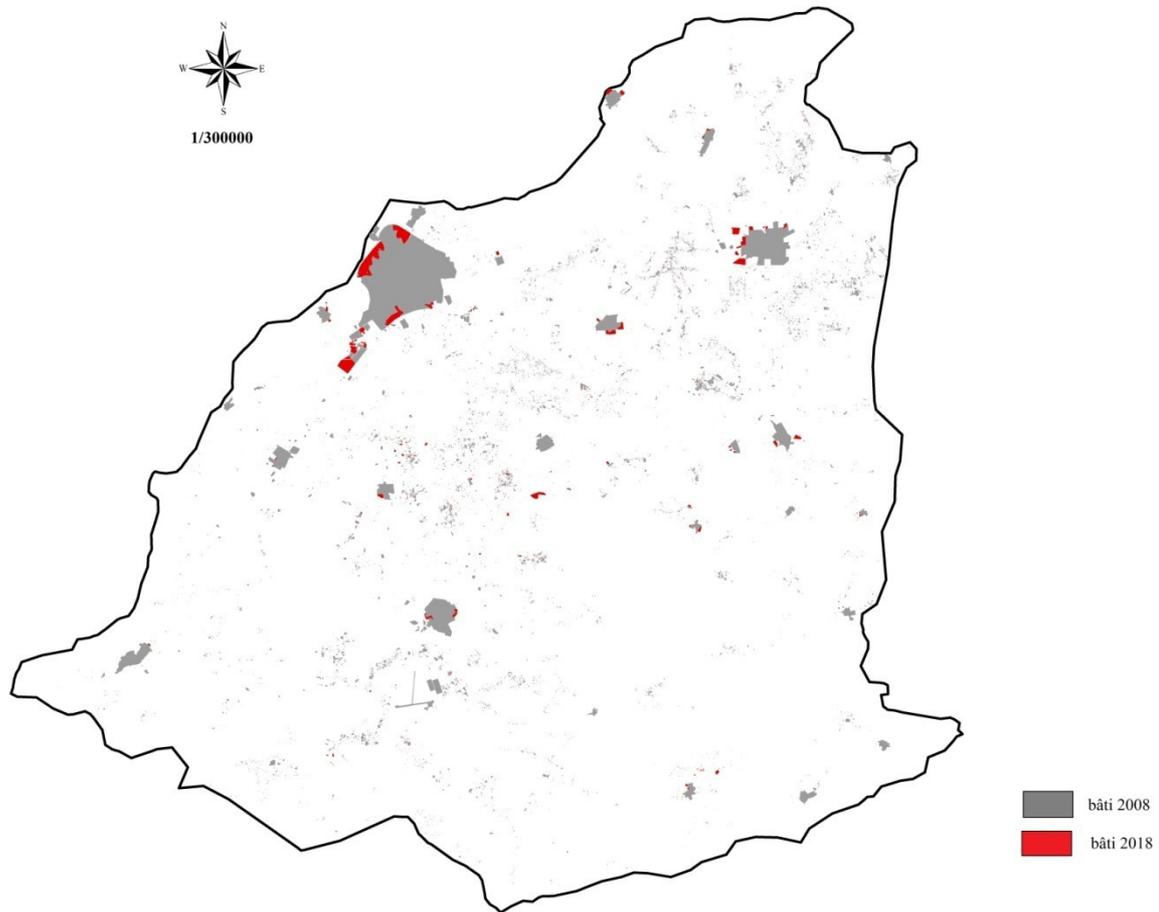


Figure 4.8. Evolution de l'urbanisation dans le sbv d'Oued Fekan de 2008 à 2018.

La croissance urbaine s'accompagne d'une extension spatiale des villes, les espaces naturels et agricoles reculent. Dans la plaine de Ghriss, un véritable contrôle foncier est rendu difficile par la pression des populations d'une part et la mauvaise gestion du programme de « retour population » d'autre part. Les villes s'étalent outrageusement dans des périphéries inconsistantes, les parcelles agricoles sont tirillées. Depuis dix ans, les constructions se sont multipliées, notamment les maisons individuelles (497 Ha de terrain a été bâtis dans cette période), les communes ont une forte croissance urbaine, les villages en alentour sont intégrés progressivement à l'urbanisation et deviennent des communes périurbaine.

On remarque sur la figure 4.8 que les communes périphériques, essentiellement au centre et vers l'ouest en allons vers Tighennif sont les plus aménagées. L'espaces agricoles est en contact directe avec les habitants. Cela crée une discontinuité, il y a une réelle intrication de différentes activités agricoles et industrielles. S'installer dans une périurbaine pour avoir un meilleur cadre de vie et accédé à des loisirs exige souvent l'accès facile à la propriété privé, cependant les habitants choisissent des

endroits bien desservis. Les réseaux de transport permettent à l'étalement urbain d'étendre son influence. L'extension d'urbanisation exerce une pression sur l'écologie, la recherche d'un progrès individuel, disposer de plus d'espace et de meilleures qualités engendre de collectif important tel que la construction de nouveaux réseaux de transports, d'eaux et d'électricités.

On parle alors de grignotage de l'espace rural. L'extension de l'espace urbain en direction des campagnes pose des questions, en effet quel avenir pour les terres agricoles alors que les habitants recherchent une qualité de vie meilleure. Les villes de Froha, Matemore, Maousa, Ghriss et Tizi s'étalent vers de nouveaux territoires, ce phénomène d'étalement dû en grande partie au développement de l'automobile et des réseaux routiers repousse les limites de ces villes.

4.3.2 Conclusion

Une périurbanisation qui se poursuit, est le trait majeur qui marque la dynamique démographique et spatiale observée dans le sous bassin versant d'Oued Fekan. L'urbanisation exercée dans la plaine de Ghriss s'accroît, modifie l'occupation des sols, entraîne des changements importants au niveau de l'usage des terres et emmène la disparition d'espaces à fortes qualités écologiques, telle que les zones inondables. Cette extension importante des surfaces artificialisées, dans les bassins versants comprenant des agglomérations, entraîne aussi la dégradation de la qualité de l'eau et une diminution des nappes souterraines, et par conséquent des conflits d'usage pour les ressources en eau dont le prélèvement augmente avec l'étalement urbain.

Les surfaces artificialisées sont le paramètre clé pour quantifier l'étalement urbain. Les techniques classiques de suivi de cet étalement, basées sur des relevés sur le terrain et l'usage de photographies aériennes, permettent de produire des cartographies précises et d'en reconstituer l'historique. Cependant, elles présentent d'inconvénients, coût élevé, sont consommatrices en temps, et ne sont généralement pas mises à jour régulièrement. Ceci explique l'intérêt croissant des experts suscité par la cartographie et le suivi de l'étalement urbain à partir des images satellitaires et de Systèmes d'Information Géographiques. Il existe une variété de techniques qui permettent d'évaluer et mesurer le tissu urbain à partir d'images satellitaires. Face à la diversité des approches et méthodes existantes se pose le problème du choix d'une méthode adaptée à la mise en évidence de l'étalement urbain. Selon ce type d'applications sur de larges territoires, l'utilisation d'images de télédétection à très haute résolution spatiale est inutile. Pour ce type d'étude, qui ne nécessite pas une classification avec une nomenclature détaillée (exemple : surfaces artificialisées, surfaces non artificialisées), les images satellite à moyenne et haute résolution spatiale de type Sentinel, Landsat ou SPOT, ont une résolution spatiale et spectrale assez suffisante. Dans notre cas d'étude, le choix d'images à moyenne/haute résolution traitées selon une approche orientée objet apparaissent adaptées à l'hétérogénéité du milieu, contrairement aux classifications basées sur le pixel. La détection automatique de la présence de bâti est rendue possible, même si la géométrie de contour du bâtiment reste peu fiable, les résultats obtenus

à travers cette étude sont satisfaisants et soulignent l'influence des critères de taille, de voisinage en plus de la signature spectrale dans la qualité d'extraction des bâtis.

Nous ne sommes pas dans un état de pénurie spatiale, le terrain existe, il doit être bien aménagé et mieux orienté. Que ce soit dans le cadre de l'approche spatiale ou de l'approche temporelle, la télédétection s'avère nécessaire, voire indispensable dans les recherches sur l'étalement urbain. Les mesures et les cartes obtenues à la suite du traitement des données de télédétection offrent des outils quantitatifs et qualitatifs pour caractériser l'urbanisation et contribuer à une gestion durable d'un bassin versant.

4.4 Investigation de la relation entre l'urbanisation et l'artificialisation du sol, le couvert végétale et la température de surface

4.4.1 Introduction

Le phénomène de conversion de terres couvertes de végétation en terres imperméables, est à l'origine de la pollution de l'air et de l'eau et la dégradation des écosystèmes. La tendance mondiale d'urbanisation présentant des défis dont la modification du climat local résultant d'un stockage thermique renforcé et des rejets par les structures bâties, ce qui augmente la température de surface, effet appelé îlots de chaleur urbains. Ce dernier est causé par la distribution spatiale de la température de surface du sol (Ts), contrôlée par le flux de chaleur à la surface et exacerbé par l'urbanisation. (Dousset and Gourmelon, 2003; Sun et al., 2010).

La télédétection continue de jouer un rôle important dans la compréhension de notre environnement, son champ d'utilisation ne cesse de s'élargir. Pour caractériser l'état énergétique et hydrique de surface, on fait appel à la télédétection spatiale qui devient un outil très puissant. La température de surface est une variable clé pour évaluer les échanges d'énergie entre le sol, la biosphère et l'atmosphère. Les échanges de chaleurs entre la surface et l'atmosphère se font se forme de chaleur latente (évaporation ou transpiration) ou de chaleur sensible. La répartition de ces flux va déterminer en partie la température de surface. cette variable est mesuré par satellite dans le domaine spectral de l'infrarouge thermique (Benoit Coudert et al., 2007).

De nombreux chercheurs ont proposé des algorithmes spécifiques pour l'extraction de la température de surface à partir des données de la télédétection multi sources. (NOAA AVHRR, ASTER, MODIS, Landsat TM/ETM+). Dans le présent travail on s'intéresse aux données de satellite Landsat 8 OLI-TIRS pour le calcul de la température de surface en appliquant la méthode du canal unique. Des études ont atteint le constat clair sur la corrélation entre la perte de couvert végétal et l'augmentation de la température de surface, ce qui a fait de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI),

l'indice le plus souvent préconisé dans les études des îlots de chaleur urbains. (Ysabelle Filiatreault, 2015). L'Indice de Bâti par Différence Normalisée (NDBI) appelé aussi indice d'urbanisation est un bon indicateur d'évolution de température. Les fortes corrélations positives du NDBI avec la température de surface laissent entendre que la perte du couvert végétale par urbanisation orchestre le comportement thermique.

L'extraction de la température de surface (Ts) à partir des données de télédétection a fait l'objet de plusieurs recherches au cours de la dernière décennie. Ce paramètre clé pour de nombreuses applications, est calculé à partir des capteurs thermiques à bord de satellites. Plusieurs travaux sont publiés au cours des dernières années pour évaluer les techniques de l'extraction de la Ts, sa précision, et ses applications à l'étude des phénomènes. Le développement d'algorithmes pour extraire la Ts avec précision n'est pas une tâche facile en raison des difficultés dans la correction de l'absorption atmosphérique, les émissions atmosphériques et de l'émissivité de surface (Watts et al., 1996). la difficulté est liée à l'influence de l'atmosphère sur la transmission des radiations infrarouges, au couplage température et émissivité de surface, et à la performance du capteur du satellite (Liu et al., 2009). Les échanges entre le sol et la couche d'atmosphère près du sol compliquent également les équations de bilan d'énergie (Abdellaoui et al, 1985). Pour remplacer la température de surface mesurée traditionnellement à des points d'observations locaux par celle issue de la télédétection, il est nécessaire de pouvoir l'estimer avec une précision adéquate (Liu and Zhang, 2011). À cette fin, il est inévitable de résoudre les problèmes de corrections atmosphériques et de l'émissivité (Sobrino et al., 2004). La température de surface continue à susciter encore l'intérêt de la communauté scientifique, des travaux sont toujours publiés dans ce domaine. Les questions n'ont pas trouvé de solution définitive satisfaisante, de nombreuses solutions et de nombreux algorithmes sont développés. Les auteurs introduisent des paramètres de modélisation ou d'ajustement communs ou spécifiques pour faire tourner les algorithmes. Les utilisateurs non-initiés aux principes physiques peuvent alors être pour le moins désorientés quant aux choix d'algorithmes à utiliser dans leurs applications thématiques particulières (Aicha Benmecheta, 2016).

La température calculée à partir des données satellitaires n'est pas reliée de façon directe à la température de surface utilisée pour évaluer les différents termes du bilan d'énergie. En effet, en dehors de l'influence de l'atmosphère, la mesure radiométrique infrarouge, appelé température de brillance, est une quantité très complexe dépendant à la fois des propriétés physiques et thermodynamiques de la surface de configuration du système d'acquisition (Hamimed et al, 2015). L'extraction des températures à partir des données de télédétection nécessite des modèles complexes qui permettent d'établir le lien entre la mesure et l'ensemble des paramètres physiques qui l'expliquent (Becker et al, 1995).

Le lancement du satellite Landsat-8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission) en février 2013 assure la continuité des données de télédétection à haute résolution spatiale acquise par deux instruments embarqués. Le radiomètre multi-spectral OLI (Operational Land Imager) est l'instrument principal, il permet d'acquérir des images dans neuf bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge, sept de ces bandes spectrales étaient déjà présentes sur l'instrument ETM+ de Landsat-7, Deux canaux supplémentaires ont été ajoutés, destinés à la correction atmosphérique et à la détection des nuages (James R Irons et al, 2012). Exceptant la bande panchromatique d'une résolution optique de 15 m, cette dernière est de 30 mètres sur toutes les bandes. Le radiomètre multispectral infrarouge à deux canaux TIRS (Thermal Infrared Sensor) permet de répondre aux caractéristiques propres à l'infrarouge thermique à une résolution spatiale de 100 m. Ce nouveau capteur comprend deux bandes dans la fenêtre atmosphérique comprise entre 10 et 12 μm , ce qui représente un progrès par rapport à l'unique bande thermique présente sur l'ancien capteur ETM+ (James R Irons et al, 2012). La présence de deux bandes TIR ouvre la possibilité d'appliquer la méthode des deux canaux, appelée aussi Split-Window (SW) en plus des algorithmes du canal unique, mono-canal, en anglais Single-Channel (SC) utilisée dans les capteurs précédents embarqués sur les plates-formes Landsat, avec une seule bande de TIR (Jiménez-Muñoz et al., 2014). Cette méthode, des deux canaux, est basée sur le concept de l'absorption différentielle pour estimer la contribution atmosphérique du signal. La base de cette technique est que l'atténuation atmosphérique subie par le rayonnement émis par la surface est proportionnelle à la différence entre les luminances mesurées par le capteur simultanément dans deux canaux thermiques différents (McMillin L., 1975). La précision des algorithmes utilisant deux bandes thermiques reste basée sur l'estimations des valeurs de certaines données atmosphériques particulièrement la teneur en vapeur d'eau, qui est requise comme entrée, en plus de l'émissivité de surface au niveau des deux bandes TIR (Jiménez-Muñoz et al., 2014).

Depuis janvier 2014, des recommandations par l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) de ne pas utiliser la bande 11 de l'infrarouge thermique de Landsat 8 en raison de l'effet de lumière parasite, "stray light", qui a entraîné une grande incertitude d'étalonnage, et ont suggéré d'utiliser les données de la bande 10 en tant que bande spectrale unique pour estimer la T_s (Fei Wang et al, 2015). Cependant, étant donné que la bande 10 de Landsat 8 (TIRS-1) est situé dans une région d'absorption atmosphérique inférieure, dont les valeurs de transmissivité atmosphérique sont élevées, il est préférable d'utiliser cette bande (Jiménez-Muñoz et al., 2014). Par conséquent notre choix de méthode pour l'extraction de la T_s se limite par la méthode SC. La méthode du canal unique, ou inversion de l'équation de transfert radiatif (TR) à partir de température de brillance dans un unique canal qui corrige la luminance des différents effets atmosphériques (J Hook et al., 1992), permet d'estimer la température de surface avec les mesures de radiance utilisant un seul canal infra rouge. Cette méthode nécessite un code de radiance/transmittance de haute qualité pour estimer les quantités atmosphériques, une bonne connaissance de l'émissivité de surface et d'un profil atmosphérique

précis, ainsi qu'une considération des effets de la topographie (Sobrino et al., 2004). Un algorithme de canal unique généralisé pour extraire la Ts de n'importe quel canal TIR a été développé par (Jimenez-Munoz et Sobrino, 2003) et (Jiménez-Muñoz J. C., 2009), à condition que l'émissivité de surface et la teneur en vapeur d'eau atmosphérique totale soient connues.

4.4.2 Source de données

Notre zone d'étude est entièrement incluse dans la scène Landsat 8, Path / Row 197/36. Les images utilisées dans cette analyse ont été acquises respectivement en Février, Mai, Août et Novembre de l'année 2018, de sorte qu'elles couvrent les quatre saisons de l'année. Les images sont disponibles et téléchargeables gratuitement sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov>

Tableau 4.1 : Les métadonnées des images satellitaires utilisées.

Satellite	Sensor	Path/Row	Year	Month	Time	Resolution (m)	Wavelength μm
Landsat 8	OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor)	197/36	2018	February	10:32	30 (For TIRS bands resolution is 100 m) (For band 8 resolution is 15 m)	Band 1: 0.435-0.451
				May			Band 2: 0.452-0.512
				August			Band 3: 0.533-0.590
				November			Band 4: 0.636-0.673
							Band 5: 0.851-0.879
							Band 6: 1.566-1.651
							Band 7: 2.107-2.294
							Band 8: 0.50-0.68
							Band 9: 1.363-1.384
							Band 10: 10.60-11.19 (Thermal band)
							Band 11: 11.50-12.51 (Thermal band)

4.4.3 Calcul de température de surface

la Température de surface est calculée à partir de l'équation xx (Weng et al., 2004)

$$T = \frac{T_b}{1 + \left(\lambda + \frac{T_b}{\rho}\right) L_n \varepsilon}$$

Où :

T_b = température de brillance

ε = émissivité

λ = longueur d'onde du rayonnement émis.

$\rho = h \times c / \sigma$ ($1,438 \times 10^{-2}$ m K)

σ = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J K⁻¹)

h = constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js)

c = vitesse de la lumière ($2,998 \times 10^8$ m sec⁻¹)

4.4.4 Conversion des données OLI/TIRS en radiance (luminance)

Les données de Landsat 8 sont fournis au format compte numérique (Digital Numbers) mises à l'échelle quantifiés et calibrés représentant des données d'images multispectrales. Ils sont livrés en 16 bits et doivent être redimensionnés en radiance en utilisant des coefficients d'échelle radiométrique fournis dans le fichier de métadonnées du produit (fichier MTL).

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

La radiance, la quantité physique mesurée par le capteur, L_{λ} exprimée en (Watts/(m² * srad * μm)) se calcule à partir du compte numérique selon l'équation yy. M_L est le facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir des métadonnées (RADIANCE_MULT_BAND_x, où x est le numéro de bande). A_L est le facteur de redimensionnement additif spécifique à la bande à partir des métadonnées (RADIANCE_ADD_BAND_x, où x est le numéro de bande). Q_{CAL} correspond à la valeur du pixel en compte numérique calibrée pour la bande thermique spécifique (TIRS-1 dans le cas de LANDSAT 8).

4.4.5 Conversion des données TIRS en température de brillance

Le calcul de la température de surface à partir de la bande thermique se fait avec la bande originale. Après avoir converti les données TIRS des valeurs brutes de comptes numériques à des radiances spectrales, elles sont ensuite converties en température de brillance en utilisant les constantes thermiques fournies dans le fichier de métadonnées (K1 et k2)

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{L_{\lambda}}\right)}$$

Où :

T_b température de brillance en Kelvin (K).

L_{λ} radiance/luminance spectrale du capteur (Watts/(m² * srad * μm))

ln logarithme naturel

K_1 et K_2 sont les constantes de calibration spécifique de la bande thermique du satellite LANDSAT 8 exprimée en mW.cm⁻².ster.μm⁻¹ (Barsi et al., 2007).

Tableau 4.2 : Constante de conversion thermique à partir des valeurs des métadonnées K1 et K2.

Thermal constant	Band 10	Band 11
------------------	---------	---------

K_1	774.8853	480.8883
K_2	1321.0789	1201.1442

4.4.6 Prétraitement des données OLI

Les propriétés optiques de l'atmosphère varient considérablement dans le temps et dans l'espace. Elles dépendent de la quantité d'aérosols en suspension dans l'air et du contenu en vapeur d'eau. Le signal capté par le satellite est modifié par des phénomènes de diffusion, de réflexion et d'absorption (angles et azimuts) (CCRS, 2014). La réflectance mesurée par le satellite est donc différente de celle de la surface terrestre. Les corrections atmosphériques aident à atténuer les effets liés aux effets atmosphériques, lesquels changent les propriétés spectrales spécifiques des catégories d'occupation des terres sur l'image (Kergomard, 2000). Les équations utilisées s'appliquent sur les radiances Top Of Atmosphere (TOA). Le calcul d'indices radiométriques requiert donc au préalable une correction atmosphérique des images, c'est-à-dire le passage des valeurs brutes de comptes numériques à des valeurs de réflectance de surface. Ceci peut se faire au moyen de modèles de transfert radiatif, tels que MODTRAN, ATCOR.

4.4.7 Calcul de NDVI

Les indices radiométriques, appelés aussi néo-canaux, sont des grandeurs calculées à partir de combinaison des valeurs des différents canaux pour un même objet (pixel ou région). Dans le cas de l'imagerie optique, les réflectances dans les différentes bandes spectrales (bleu, vert, rouge, proche infrarouge, etc.) sont utilisées. Les indices radiométriques servent à mettre en évidence des propriétés particulières des surfaces observées. Par exemple, dans le cas de l'imagerie optique multispectrale, la présence de végétation peut-être mise en évidence en utilisant les bandes rouge et proche infrarouge. Des indices de végétation comme le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) ont été proposés.

$$NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{RED})}{(R_{NIR} + R_{RED})}$$

Où :

R_{NIR} , réflectance dans le proche infrarouge.

R_{RED} , réflectance dans le rouge.

Cet indice est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation, ses valeurs sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux ou la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Les valeurs proches de 0 représentent les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et

le proche infrarouge. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs positives, les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

4.4.8 Calcul de l'émissivité

L'émissivité (ε) des surfaces requiert pour le calcul de la température de surface est obtenue à partir des valeurs du NDVI minimal de 0,2 et maximal de 0,5 (Jimenez-Munoz et al., 2009; Sobrino et al., 2004). Un NDVI de moins de 0,2 suggère un pixel de sol nu dont l'émissivité moyenne est de 0,97; alors qu'un NDVI de plus de 0,5 suggère un pixel couvert de végétation dont l'émissivité moyenne est de 0,99 (Sobrino et al., 2004). Pour les valeurs de NDVI se situant entre 0,2 et 0,5 les pixels devraient être d'une composition mixte, donc une surface comportant à la fois des sols nus et de la végétation, dont l'émissivité se calcule comme suit (équation xx)

$$\varepsilon = P_v (\varepsilon_v - \varepsilon_s) + \varepsilon_s$$

$$\varepsilon = P_v (0,004) + 0,986$$

Où

ε_v = Émissivité de la végétation = 0,99 , valeur typique pour la végétation (Sobrino et al., 2004)

ε_s = Émissivité du sol = 0,986 , valeur choisie pour le sol

p_v = Portion de végétation obtenue avec l'équation xx selon (Carlson & Ripley, 1997)

$$P_v = \frac{(NDVI - NDVI_{MIN})}{(NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})}$$

Où :

$NDVI_{max} = 0,5$ et $NDVI_{min} = 0,2$

4.4.9 Calcul de NDBI

L'indice de bâti par différence normalisée, Normalized Difference Built-up Index (NDBI), appelé aussi indice d'urbanisation, se base sur le fait que les zones urbaine ont généralement une réflectance spectrale plus élevé dans la bande du moyen infrarouge MIR que dans la bande du proche infrarouge PIR (Zha et al., 2003). Dans notre étude, l'NDBI a été utilisé pour extraire la classe des bâtiments et des routes et généralement pour déterminer l'aire urbaine.

$$NDBI = \frac{(R_{SWIR} - R_{NIR})}{(R_{SWIR} + R_{NIR})}$$

Où :

R_{SWIR} , réflectance dans le moyen infrarouge.

R_{NIR} , réflectance dans le proche infrarouge.

L'organigramme ci-dessous résume la méthodologie d'extraction de la Ts à partir des données de télédétection.

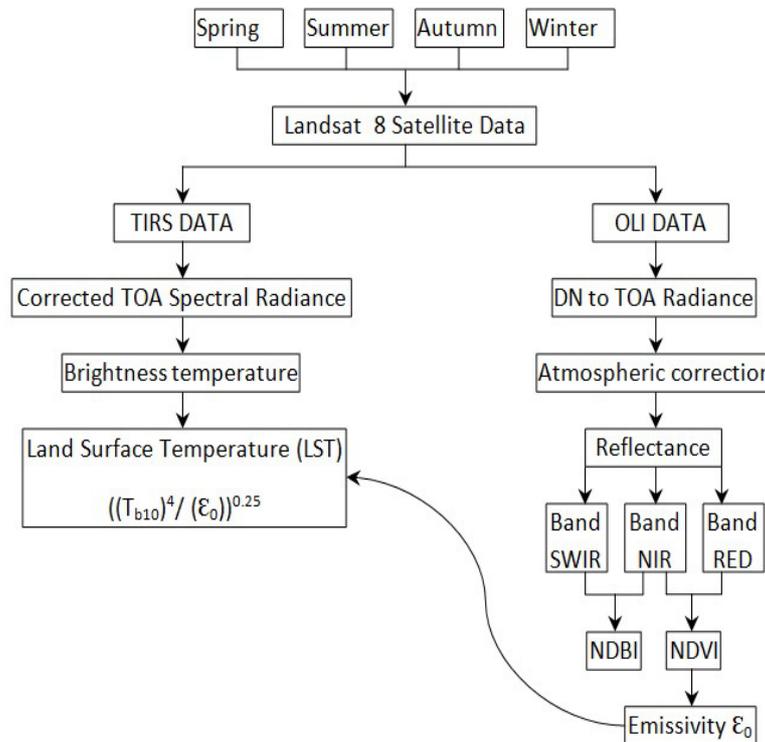


Figure 4.9. Organigramme d'extraction de la température de surface à partir des données Landsat 8.

4.4.10 Résultat et discussion

Le type d'occupation du sol est à l'origine de la différence dans la répartition de la température de surface, les propriétés thermiques des matériaux de surface en milieu urbain sont différentes de celles des zones rurales. Les zones urbaines, en raison de leurs propriétés d'imperméabilité (moins de végétation et de sols humides, plus de surfaces imperméables), sont caractérisées par une température élevée, les zones non urbaines et les sols nus se caractérisent par une température moyenne, tandis que les parcelles agricoles et les zones humides marquent des valeurs basses. L'expression la plus emblématique de ces écarts thermiques est le phénomène bien identifié de l'îlot de chaleur urbain (Oke, 1973). Les deux indices spectraux, NDVI et NDBI, ont été choisis et calculés pour l'analyse et l'investigation de la relation entre chacun d'entre eux et la température de surface. L'étude de la corrélation par méthode de régression linéaire a comme objective de trouver le meilleur indicateur entre le NDVI et le NDBI pour les études de phénomène des îlots de chaleur urbains. Le tableau 3

résume les données statistiques de la Ts, le NDVI et le NDBI, du sous bassin versant d'Oued Fekan, pour les quatre saisons.

Tableau 4.3 : Données statistiques saisonnières de la Ts, NDVI et NDBI.

Date	Minimum			Maximum			Moyenne			L'écart type		
	Ts	NDVI	NDBI	Ts	NDVI	NDBI	Ts	NDVI	NDBI	Ts	NDVI	NDBI
Novembre 18 th 2016	-1,8	-0,31	-0,41	26,66	0,83	0,38	20,122	0,169	0,014	2,091	0,088	0,059
Février, 20 th 2016	6,93	-0,27	-0,41	33,74	0,91	0,21	18,524	0,321	-0,017	3,246	0,127	0,083
Mai, 26 th 2016	24,29	-0,21	-0,46	50,46	0,84	0,37	41,157	0,265	0,025	3,187	0,079	0,06
Aout 14 th 2016	25,67	-0,17	-0,33	51,21	0,69	0,29	43,07	0,196	0,059	2,738	0,053	0,041

Les résultats obtenus de l'étude des profils moyenne pour les trois variables dans la section 3 indiquent que les valeurs de Ts et de NDBI changent proportionnellement (figure 4.10). Les valeurs moyennes les plus basses de la Ts et le NDBI sont enregistrées le mois de février (18,524 C° et -0,017 respectivement), tandis que les valeurs les plus élevées apparaissent en mai et en août (43,07 C° et 0,059 respectivement). Pour le NDVI, les valeurs les plus faibles sont enregistrées le mois de novembre et août (en raison de faible activité chlorophyllienne), tandis que les valeurs élevées concernent le mois de février avec une valeur de 0,321. Cette valeur maximale marquée diminue progressivement jusqu'au mois de mai.

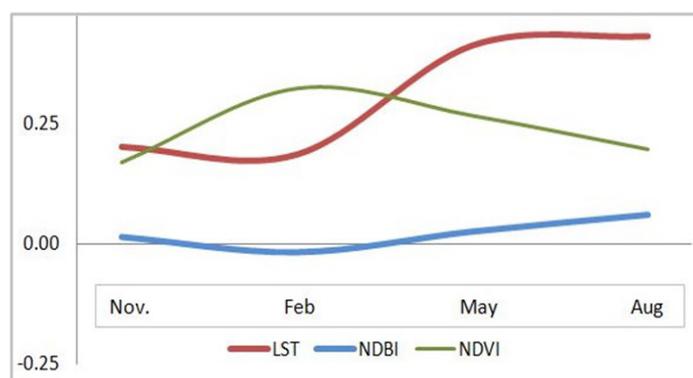


Figure 4.10. Représentation de l'évolution temporelle des moyennes de la Ts, NDVI et NDBI.

4.4.10.1 La variation de la répartition spatiotemporelle de la Ts

Le sous bassin d'Oued Fekan est caractérisé par un climat semi-aride et une sécheresse récurrente. Deux grandes périodes caractérisent notre zone d'étude, une période pluvieuse et sombre pendant les mois de novembre à mars et une autre période sèche et chaude pendant les mois de mai à septembre

(Nehal et al., 2017) les maxima thermiques sont accentués par le sirocco, un vent saharien chaud et sec venant du sud. l'extraction de la Ts de l'ensemble de la zone d'étude à partir des données de Télédétection, nous a permis d'interpréter la répartition spatiale de la Ts par rapport au type d'occupation du sol.

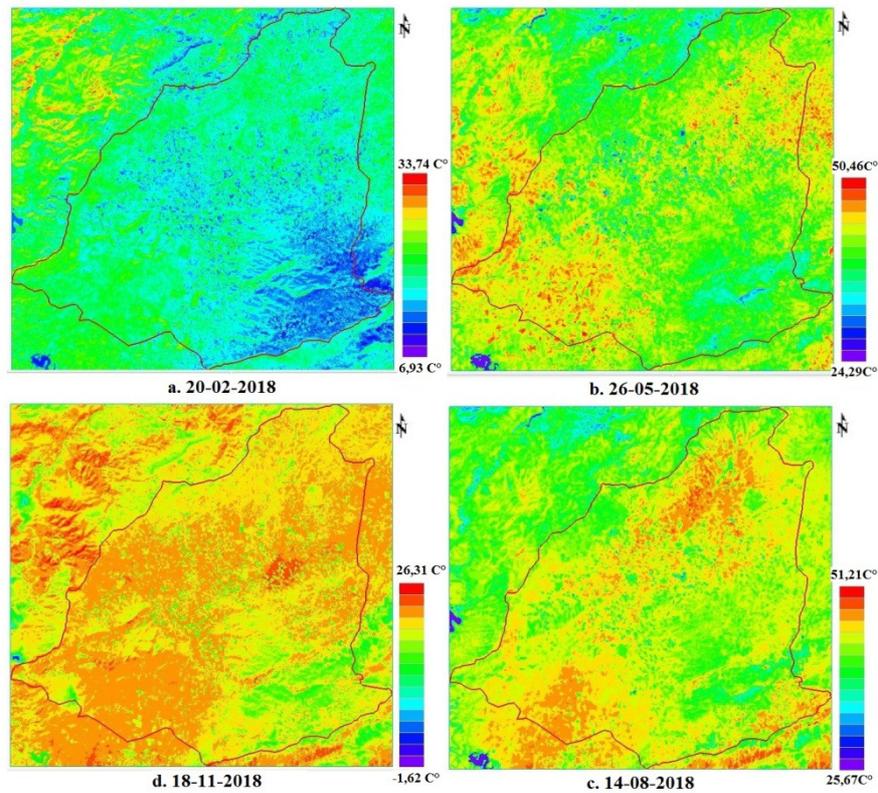


Figure 4.11. Distribution spatiale de la Ts durant quatre saisons en degrés Celsius (C°).

Comme le montre la figure 4.11, en particulier la figure 4.11.a, la partie Sud-Est a marqué des valeurs de Ts les plus froides, cette zone est située à 1000 mètres d'altitude et possède un couvert végétal dense (forêt de Nesmoth), La partie Nord-Ouest est la plus chaude, elle représente les montagnes de Bouhanifia, une région connue par sa richesse en eau thermale. Pendant la saison hivernale, les températures minimales et maximales de la surface du sol sont respectivement 6,93 C° et 33,74 C°. Pour la saison estivale, la valeur la plus basse marquée est de 25,67 C°, tandis que la valeur maximale est de 51,21 C°, une moyenne de 43,06 C° pendant la saison chaude estivale contre une moyenne de 18,52 C° durant l'hiver. Bien qu'il s'agisse d'une zone agricole, les valeurs de Ts marquées sont importantes. Le type d'urbanisation exercé dans la plaine et l'absence des villes métropolitaines expliquent l'absence des îlots de chaleurs urbains et l'homogénéité de la répartition de la Ts sur toute la plaine.

4.4.10.2 Validation de résultats de la Ts

La validation de la distribution spatiale de la température de surface et de sa relation avec le type d'occupation du sol, a été faite en appliquant la fonctionnalité propulsée par ESRI sur l'ENVI

(Reference Map Link), chaque sélection d'un pixel quelconque sur l'image de la Ts est localisé sur l'imagerie.



Figure 4.12. Interprétation visuelle de la distribution de la Ts en utilisant "Reference Maplink"

Les zones urbaines, les villes de Mascara, Tighenif et Ghriss ont montré une différence de température de surface plus élevée que les parcelles agricoles qui les entourent d'environ 2 à 3 C° en saison hivernal et printanière. Cette différence de Ts était moins importante en été et automne. Ces résultats impliquent l'étude de la relation entre l'NDBI et la Ts d'une part, pour analyser l'implication de la croissance urbaine sur les caractéristiques thermiques, et entre l'NDVI et la Ts d'autre part pour démontrer l'impact du couvert végétal sur le comportement thermique.

4.4.10.3 Variation spatio-temporelle de l'NDVI et l'NDBI

Dans les conditions climatiques semi-aride, plus il y aura de couvert végétal dense, plus le NDVI marquera de forte valeur et la température de surface demeurera fraîche en raison des faibles émissions thermiques des plantes par rapport aux fortes variations thermiques des sols nus due à une faible évaporation en temps sec. L'artificialisation du sol par urbanisation (forte valeur de NDBI) modifie les flux d'énergie en surface et s'accompagne ainsi d'une augmentation de la température de l'air et d'une diminution de son humidité. Les valeurs de l'NDVI et L'NDBI sont présentés respectivement dans les figures 4.13 et 4.14.

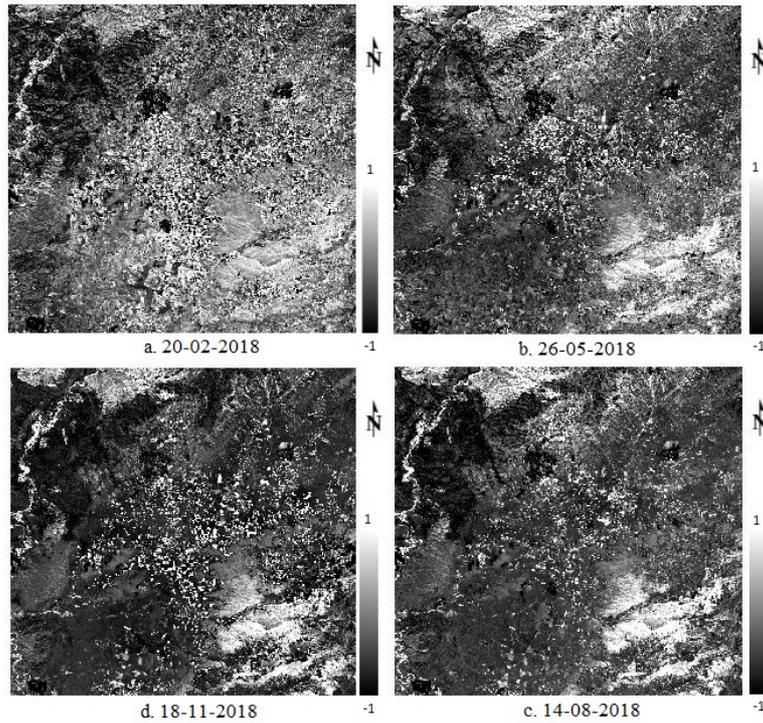


Figure 4.13. Distribution spatiale de NDVI durant quatre saisons.

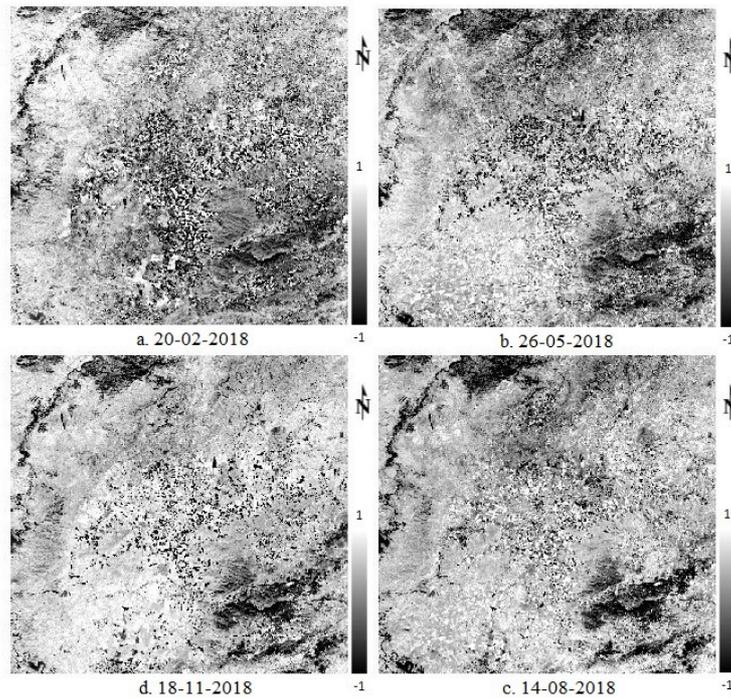


Figure 4.14. Distribution spatiale de NDBI durant quatre saisons.

Comme le montre la figure 4.15, il existe une forte corrélation négative entre les valeurs de ces indices, indiquant une relation indirecte entre eux. Les valeurs maximales d'NDVI indiquent les surfaces riches en végétation, tandis que les valeurs maximales d'NDBI indiquent les zones bâties et

artificialisés. Les deux indices ont été calculés pour différencier entre les types d'utilisation et de couverture du sol

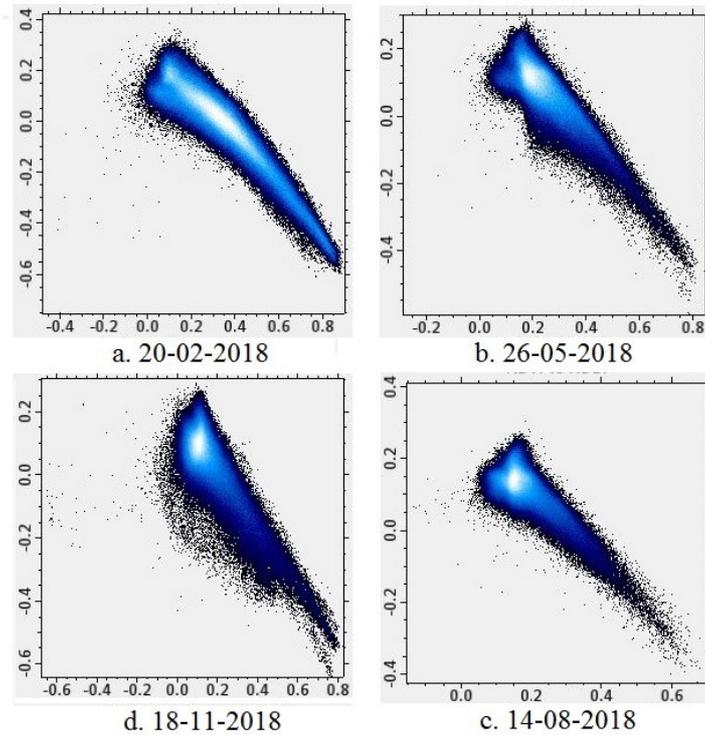


Figure 4.15. Etude de corrélation entre NDVI (axes x) et NDBI (axes y) pour quatre saisons.

4.4.10.4 La relation entre le NDVI et la Ts

Plusieurs études ont suggéré l'utilisation combinée de l'indice de végétation et de la Ts des sols mesurée dans l'infrarouge thermique, pour estimer le taux d'humidité des sols, ainsi que l'état de stress hydrique des végétaux (Jackson *et al.*, 1977 ; Goward *et al.*, 2002). Parmi les techniques développées, la méthode dite 'du triangle', suppose que la température de surface des sols dépend essentiellement de la couverture végétale et de l'humidité des sols.

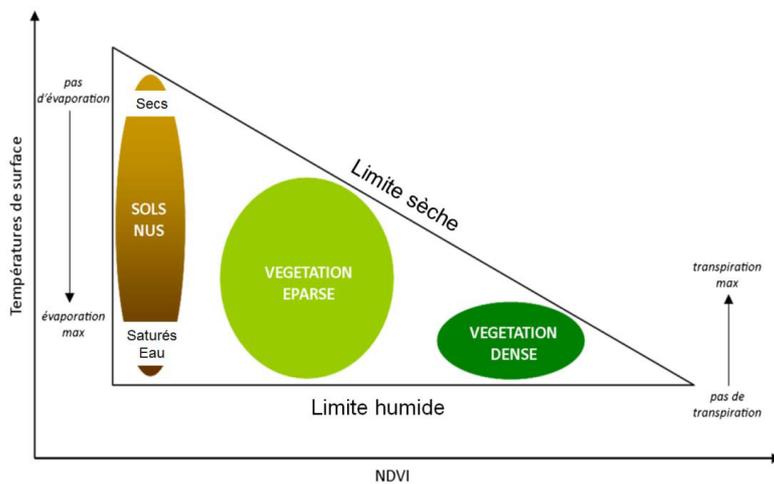


Figure 4.16. Relation entre la Ts et le NDVI (Lambin et Ehrlich, 1996)

Le côté du triangle correspondant au NDVI le plus faible représente la droite des sols nus, depuis les sols secs où les températures sont les plus élevées, jusqu'aux sols saturés en eau où les températures sont les plus basses. Le sommet en bas à droite du triangle correspond à la densité maximum de végétation. La droite reliant les températures de surface les plus élevées (sols secs) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite sèche'. Celle reliant les températures de surface les plus basses (sols humides) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite humide'. La température de surface des sols est reliée à l'indice de végétation par une relation linéaire décroissante. Plus la végétation a une densité importante, plus la T_s est faible. La végétation régule la T_s en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration. Les résultats obtenus à partir de la corrélation entre T_s et le NDVI ont montré une corrélation négative et inverse entre les valeurs de ces deux variables.

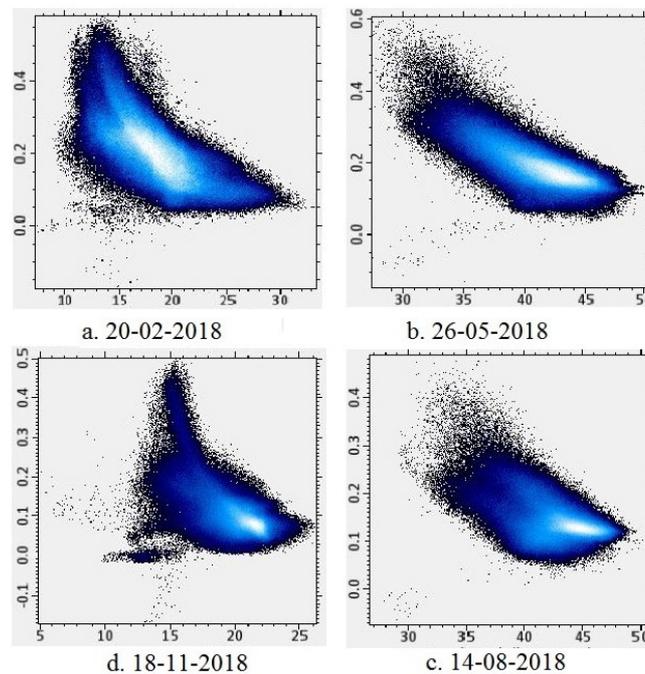


Figure 4.17. Etude de corrélation entre T_s (axes x) et NDVI (axes y) pour quatre saisons.

Lorsque la végétation est dense, une faible température de surface et une valeur de NDVI forte sont marquées. Par contre, lorsque le sol est nu, une température élevée de ce dernier correspond plutôt à un NDVI faible. La relation entre la T_s et le NDVI n'est pas stable au cours de l'année, elle est plutôt différente et dépendante des quatre saisons.

4.4.10.5 La relation entre le NDBI et la T_s

Le remplacement des sols végétalisés et perméables par des bâtiments et revêtements imperméables a une grande influence sur la capacité de l'environnement direct à abaisser les températures journalières par évaporation ou évapotranspiration et par ombrage. La réduction de la couverture végétale et la multiplication des nouvelles bâtis augmente la surface collectant le flux radiatif solaire et entraîne une absorption plus importante de l'énergie solaire incidente ce qui augmente la T_s . L'analyse de la

relation entre les données de la Ts et le NDBI montre qu'il existe une forte corrélation positive et directe entre les valeurs de ces variables. Cette corrélation a été marquée durant les quatre saisons. Lorsque le NDBI augmente, la Ts augmente également.

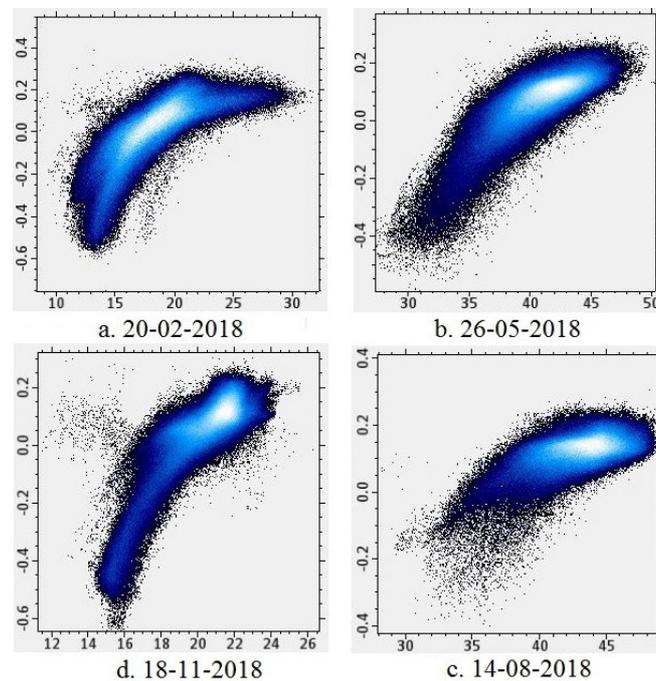


Figure 4.18. Etude de corrélation entre Ts (axes x) et NDBI (axes y) pour quatre saisons.

4.4.10.6 Etude approfondie entre la Ts, le NDVI et le NDBI

Le diagramme de dispersion ou de corrélation (Scatter Diagram) est un outil de contrôle et d'aide à la décision pour vérifier l'existence de corrélation ou d'une relation entre variables de nature quantitative. L'objectif de cet outil est d'analyser la possible relation de cause à effet entre deux variables et de vérifier des hypothèses. Il s'utilise dans un contexte de mieux comprendre certains phénomènes. Le diagramme de dispersion consiste en un graphique où les deux axes correspondent à une variable (une mesure d'un phénomène) différente; La Ts et le NDVI/NDBI dans notre cas; Par un certain nombre d'expérimentations, où une des deux variables est modifiée, on inscrit un point correspondant aux valeurs des deux variables sur le graphique. On obtient alors un nuage de points, d'où il est possible d'analyser la forme des points et de prédire le comportement de l'une des deux variables en fonction de la variation de l'autre. Pour une étude plus approfondie entre la Ts et les deux indices de NDVI et NDBI, nous avons développé un algorithme qui permet de choisir le nombre de point retenu lors de la représentation de la corrélation entre la Ts/NDVI d'une part, et la Ts/NDBI d'autre part. Le critère était de pouvoir représenter la zone d'étude entière en fixant un pas (une valeur fixe qui permet d'incrémenter les valeurs de NDVI/NDBI du Minimum au Maximum). La méthode qui permet de définir ce pas est expliquée dans la relation suivante:

$$\text{PasNDBI} = (\text{MAX}_{\text{NDBI}} - \text{MIN}_{\text{NDBI}}) / n$$

$$\text{PasNDVI} = (\text{MAX}_{\text{NDVI}} - \text{MIN}_{\text{NDVI}}) / n$$

Où:

n : est le nombre de points retenus (nous avons fixé n à 50 points). L'algorithme, développé en C++, permet par la suite de calculer la valeur moyenne de la Ts des mêmes pixels de NDVI/NDBI.

Les résultats obtenus sont présentés dans les figures. 4.19 et 4.20.

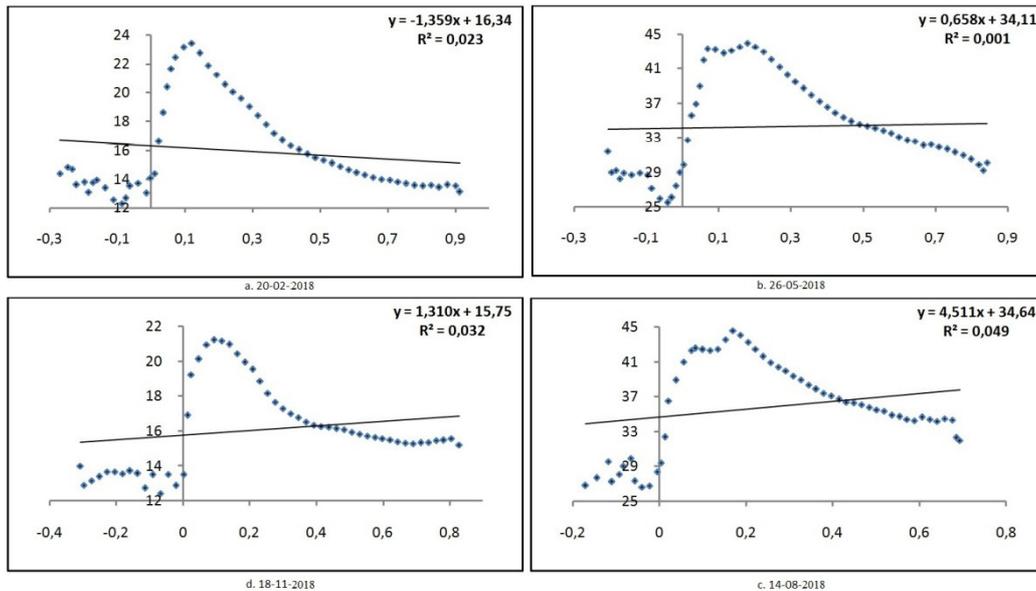


Figure 4.19. Diagramme de corrélation entre NDVI (axes x) et la moyenne de la Ts (axes y).

Un nuage de points ovale couvre une surface importante indique une faible corrélation positive lorsque les valeurs de NDVI sont inférieures à 0,18 pour les mois de Novembre et Février et à 0,2 pour les mois de Mai et Aout. Lorsque les valeurs de NDVI dépassent ces deux seuils (NDVI > 0,18 en hiver et automne et NDVI > 0,2 en printemps et été), une corrélation négative s'apparaisse sur tous les graphes, mais se varie d'une saison à l'autre, aucune tendance stable n'a été identifiée. Le changement saisonnier évident des valeurs de NDVI implique que l'utilisation de cet indice est compliquée pour comprendre le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

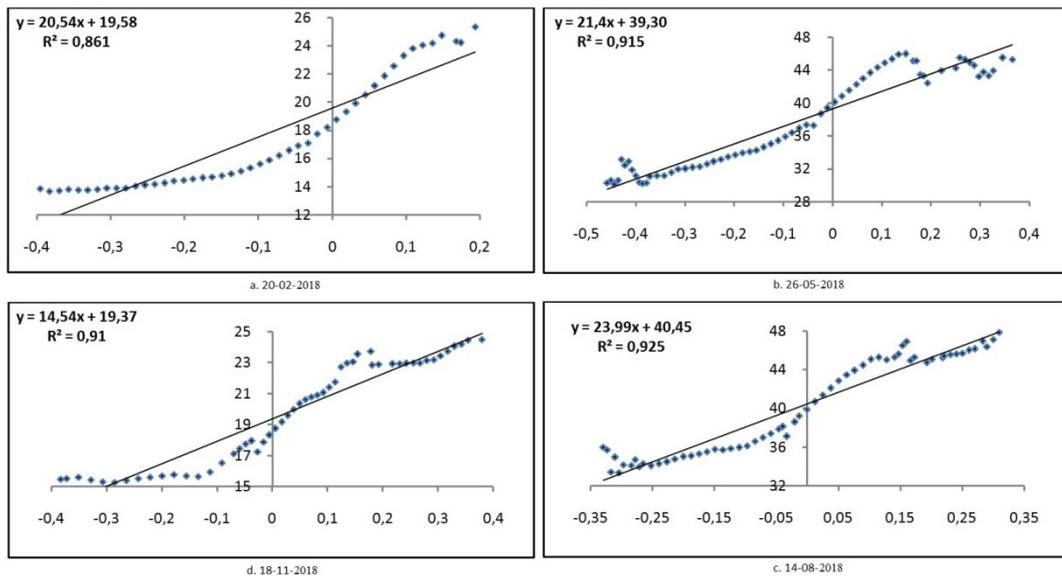


Figure 4.20. Diagramme de corrélation entre NDBI (axes x) et la moyenne de la Ts (axes y).

Le nuage des points du diagramme de dispersion entre le NDBI et la Ts est rapprochés, situés sur une même diagonale indiquant une forte corrélation positive presque colinéaire, la valeur du coefficient de corrélation des quatre graphes varie de 0,861 ; 0,915 ; 0,925 ; 0,91 durant les mois de février, mai, août et novembre respectivement. La variation moins importante de NDBI avec les saisons fait de cet indice évident pour l'analyse de l'effet de chaleur urbain.

4.4.10.7 Dépendance spatiale et corrélation entre NDBI, NDVI et Ts à partir de deux profils

Pour une étude plus profonde de la distribution spatio-temporelle de la Ts, NDBI et NDVI, des profils de chaque indice ont été tracés dans deux zones différentes. La première, située dans la ville de Mascara, couvre un tissu urbain compacté, des routes et des terrains agricoles situés dans les périphériques. Alors que la seconde, située dans la partie ouest, couvre des constructions éparpillées, des eaux du barrage et des prairies qui l'entourent. Des profils horizontaux et verticaux ont été établis dans les deux zones pour représenter la relation entre la couverture du sol et la Ts (figure 4.21). Les lignes de profils ont été affichées sur des images Google Earth acquises le 05/04/2018.

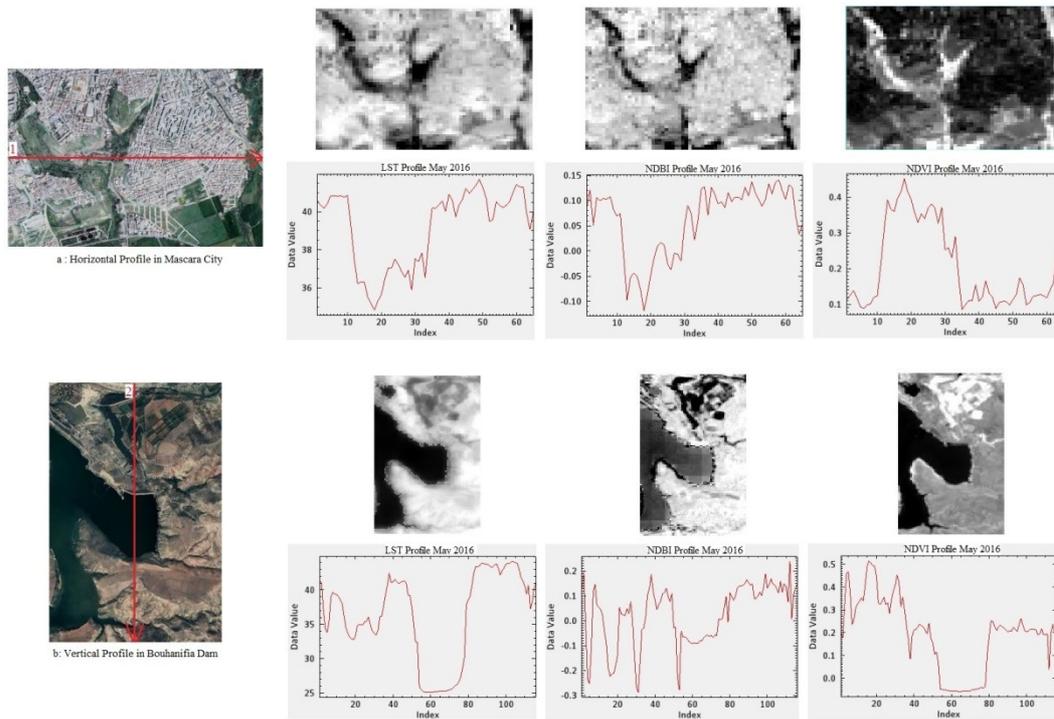


Figure 4.21. La corrélation entre NDBI, NDVI et Ts à partir de profils vertical et horizontal

En analysant les cartes et les profils obtenus, il a été marqué que les zones bâties et les terres stériles ont enregistré une température de surface plus importante que les zones couvertes de végétation les prairies et les zones humides. Le processus d'urbanisation dans la plaine a eu un impact significatif sur les caractéristiques thermiques de la zone étudiée, car les températures moyennes étaient plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones suburbaines et rurales. Les zones fortement industrialisées et les terrains bâtis, densément peuplés, sont étroitement associés aux valeurs maximales de température. Sauf dans les zones humides où le profil NDVI montre une meilleure corrélation, les deux profils Ts et NDBI varient parallèlement avec une forte corrélation avec tous les types de couverture du sol. Les trois indices, Ts, NDBI et NDVI, ont permis de décrire de manière qualitative la distribution spatiale et la variation temporelle de la température de surface par rapport aux types de couverture du sol, et le comportement thermique du SBV d'Oued Fekan.

4.5 Conclusion

Sur un bassin versant, il est fréquent de rencontrer des types d'occupation du sol hétérogène que l'on peut grossièrement diviser en surfaces végétales et non-végétales. En ce qui concerne les surfaces végétales, elles varient des forêts, en passant par les cultures. Les aires non-végétales incluent les surfaces d'eau, les sols nus, les affleurements rocheux. La transformation du paysage, l'artificialisation des sols, l'étalement urbain au détriment des terres agricoles contribuent à modifier sensiblement le bilan radiatif à l'échelle locale du sous bassin versant d'Oued Fekan. Notre étude a démontré l'importance du changement thermique imposé par le changement dans l'utilisation du sol dans une

région à vocation agricole. Les données OLI/TIRS de Landsat 8 ont été adaptées pour l'extraction de la Ts en appliquant l'algorithme du canal unique et calculer les deux indices de végétation et de bâti. L'analyse de la distribution spatiale de la Ts, NDVI et NDBI nous a permis d'identifier la relation entre le type d'occupation du sol et son impact sur la température de surface. Le diagramme de corrélation entre les trois variables durant les quatre saisons et la forte corrélation entre la Ts et le NDBI durant toutes les saisons suggère que les zones urbaines ont le plus grand impact sur la Ts. en comparant la corrélation entre le NDVI/NDBI et la Ts, la distribution spatiale de cette dernière peut être mieux expliquée par le NDBI que par le NDVI couramment utilisé, cet indicateur précis est recommandé pour étudier l'effet des îlots de chaleur urbain.

CHAPITRE V

Etalement urbain non planifié et son impact dans l'aggravation du risque d'inondation. Extraction du réseau hydrographique par photo interprétation et à partir des images radar SRTM, délimitation des zones inondables.

5.1 Introduction

Les changements hydrologiques inhérents à une urbanisation qui se fait à outrance et aux diverses actions d'aménagement, parfois imprudentes, augmentent la vulnérabilité de nos villes et de nos espaces face au risque d'inondation. L'augmentation des coefficients de ruissellement inhérente à l'accroissement des surfaces imperméables modifie le sens d'écoulement des eaux. (Noômène Fehri, 2014). Le phénomène d'augmentation des surfaces imperméables des bassins versants, envahis par l'urbanisation, entraîne en premier lieu une augmentation des volumes d'eaux ruisselée plutôt que son infiltration (Chocat Bernard, 1997). La disponibilité des données de la télédétection et le progrès de l'ensemble des techniques de traitement informatique de ces données, permet la caractérisation physique et hydrologique des bassins versants. Il est important de connaître la structure hydrographique du bassin et comprendre le système de circulation d'eau. L'étude des risques d'inondations particulièrement, et la gestion des territoires généralement, exige une connaissance détaillée et précise sur le réseau hydrographique.

Les inondations sont les catastrophes naturelles les plus répandues et les plus coûteuses à l'échelle mondiale et nationale. Le nord d'Algérie, le pourtour méditerranéen est fréquemment touché par des inondations violentes liées aux crues éclair. Le phénomène d'inondation n'est pas nouveau dans le sous bassin versant d'Oued Fekan, ce dernier est régulièrement touché par des épisodes de crues soudaines. Nous avons tous en tête le dernier en date, celui de janvier 2017, qui a causé de nombreux dégâts matériels. Un cours d'eau ou un ruisseau suffit pour rendre réelle la menace d'inondation. La présence d'un réseau hydrographique dense qui traverse la plaine multiplie ce risque. L'expansion urbaine détaillée dans le chapitre précédent a contribué à exposer davantage les populations résidents dans la plaine.

L'urbanisation importante des zones inondables s'est effectuée par ignorance des populations qui ont eu tendance à oublier les dangers, vu qu'il n'y a pas eu de crues catastrophiques, ceci est dû à la faible précipitation que la plaine de Ghriss a vécu pendant de longues années. Cette urbanisation progressive s'exerce sur des terres de plaine qui étaient agricoles, alors que, historiquement, les villages s'implantaient en hauteur pour ne pas être inondés. Le phénomène de périurbanisation conduit à une imperméabilisation des surfaces de recharges des nappes souterraines ce qui empêche l'infiltration de l'eau dans les sols et accroît le ruissellement. La violence des épisodes météorologiques fait que le sol n'est pas capable d'absorber des volumes d'eau si importants en si peu de temps.

L'anticipation des zones inondées est particulièrement ardue car ces crues peuvent survenir sur des bassins versants de faible superficie et pour de petits cours d'eau rarement en eau. Le régime hydro-géomorphologique des cours d'eau du bassin est affecté par les perturbations associées à l'artificialisation des milieux. Il est donc nécessaire de connaître la circulation de l'eau lors des crues et inondations. Dans le présent chapitre, nous allons étudier la constitution du réseau hydrographique

du sous bassin versant d'Oued Fekan à partir de différents moyens, photo-interprétations, cartes topographiques, terrain et extraction à partir de MNT en utilisant les données de la télédétection et un système d'information géographique Open-Source.

5.2 L'organisation cyclique de la gestion du risque d'inondation

Il est important de distinguer deux types de crues, dont les dynamiques, la gestion et les conséquences sont distinctes. Il s'agit des inondations à cinétique lente et des inondations à cinétique rapide. Les inondations à cinétique lente concernent le plus souvent des bassins versants moyens à grands, comme le grand bassin versant de la Macta dont la superficie est de 14 000 km². Elles se caractérisent par une montée des eaux et une décrue lentes et progressives, de l'ordre de la journée ou plus. Les durées de submersion sont ainsi longues, et les quantités d'eau écoulées sont importantes. Ces inondations n'étant pas violentes, le risque direct pour la population est relativement limité lors de l'inondation, mais le coût des dommages liés à la durée de submersion est élevé.

Les inondations à cinétique rapide, ou inondation éclair, concernent quant à elles des bassins versants très réactifs, souvent de petite superficie, ayant une dimension allant de quelques km² à une centaine de km², comme le sous bassin versant d'Oued Fekan d'une superficie de 1185 km². Elles sont le plus souvent dues à des pluies orageuses extrêmes localisées sur des surfaces petites à moyennes (jusqu'à quelques centaines de km² pour des temps de réaction du bassin versant de l'ordre de quelques heures), et se caractérisent par une montée des eaux rapide, d'une durée souvent de quelques heures, par une charge alluviale élevée et par un fort pouvoir érosif et destructif. Le risque humain et économique est alors très élevé, car le temps d'alerte est souvent très limité et l'évacuation est difficile (Marion Tanguy, 2012). Ce phénomène spatial, qui peut s'étendre sur de vastes espaces géographiques, et cyclique, résultant d'une période de retour d'une crue. De fait, la gestion de ce risque s'organise également de façon cyclique, autour de trois temps principaux : avant, pendant et après.

Avant l'inondation, l'objectif est de mettre l'accent sur la dimension stratégique bien avant la programmation d'actions. Pendant cette phase, les outils de modélisation mis au point, permettent de simuler des événements et prévoir leurs conséquences, de tester les capacités de réaction des services d'intervention, d'évaluer l'impact des aménagements de protection. C'est avant l'inondation, quand le temps ne constitue pas une contrainte majeure, que les moyens d'action peuvent et doivent être évalués pour améliorer l'efficacité des décisions. Le volet de prévention et d'atténuation prend appui sur la connaissance et la localisation des zones à risque, et vise à réduire les vulnérabilités humaine et économique, en protégeant l'existant, en informant la population ou encore en limitant l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation (Marion Tanguy, 2012). Cette étape est basée sur l'analyse des crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque à long terme (Hostache et al., 2005).

Le volet de gestion de crise durant la catastrophe est le temps le plus marquant, c'est évidemment l'inondation en elle-même, ou chaque instant et chaque décision comptent car des biens et des personnes sont en jeu. Une des préoccupations majeures est alors de connaître l'ampleur de l'événement pour permettre le dimensionnement et le déploiement des moyens d'action.

Après l'inondation, l'objectif principal durant le volet de retour d'expérience est de tirer des enseignements et des conclusions, de mesurer l'impact, essentiellement en termes financiers et sociaux. Les moyens mis en œuvre et leur intervention sont évalués pour améliorer les actions futures. L'analyse des circonstances de l'événement permet d'envisager les politiques de prévention et de protection contre les conséquences dommageables qu'aurait un phénomène d'ampleur équivalente (Jean-Baptiste Henry, 2004).

5.2.1 Les composantes du risque

En premier lieu, il s'agit de préciser un certain nombre de concepts et notions fondamentales du risque, qui est généralement considéré comme le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. Un grand nombre de définitions de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sont proposées par les administrations, les organisations internationales et les scientifiques. Il faut cependant préciser ce à quoi chacun de ces termes fait référence. La partie qui suit présente différentes définitions de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque.

L'aléa : Gendreau (1999) définit l'aléa simplement comme une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence. Dauphiné (2001) propose l'assimilation à la probabilité d'occurrence d'un phénomène, en y ajoutant néanmoins son intensité, sa durée et l'espace qu'il affecte. D'un point de vue dimensionnel, l'aléa est une probabilité d'occurrence, utilement complétée par une dimension spatio-temporelle.

La vulnérabilité : les définitions proposées prennent en compte divers paramètres géographiques, sociaux ou économiques. Cette notion composite amène de notables différences de points de vue. La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) la définit simplement comme la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas. Le ministère de l'environnement et du développement durable français adopte une définition de la vulnérabilité qui, au sens le plus large, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux. Gendreau (1999) caractérise la vulnérabilité comme étant la fragilité des installations humaines dans l'absolu. Elle est mesurée par une période de retour, ce qui lui confère la même dimension que l'aléa. Monachesi (2001) la voit comme une caractéristique propre de la société en transformation constante et produit de l'histoire de cette société. De ce point de vue, l'origine de la catastrophe se trouve dans les modalités mêmes du développement de cette société. La difficulté d'aboutir à une définition générale de la vulnérabilité provient des multiples facteurs économiques, sociales et matérielles qui entrent en jeu.

La complexité des deux concepts d'aléa et de la vulnérabilité montre à quel point le risque est une notion composite, nécessitant une part d'expertise importante pour le mesurer et envisager une politique de gestion. Le risque est souvent exprimé par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. Dauphiné (2001) et Monachesi (2001) donnent de bons aperçus de la façon dont la société, dans tous les sens du terme, peut altérer la perception d'un risque : la connaissance scientifique, la proximité, la durée, la couverture par les médias, les dégâts occasionnés. En complément, une extension de la notion de risque est définie par le ministère de l'environnement et du développement durable: le risque majeur. Il est défini comme un risque lié à des aléas d'origines naturelles ou technologiques dont les effets prévisibles mettent en jeu un grand nombre de personnes, provoquent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées. Les inondations font partis des types de risques majeurs naturels.

Plusieurs approches du risque et de sa définition peuvent être envisagées. Il peut se définir comme un phénomène physique fonction d'un aléa (caractérisé par sa fréquence et sa gravité), des enjeux présents sur le territoire, de la vulnérabilité et de la résilience du territoire (Harding et al. 2001). Il possède ses propres logiques temporelles et spatiales demandant sans cesse à être réévaluées. Le programme de recherche du Rectorat de l'Université de Genève résume quelques définitions (Harding et al., 2001), sur une base de travail exprimée par :

$$R = f(A, E, V, I, t, s)$$

Dans cette équation, A représente l'aléa, E les éléments à risque ou les enjeux, V la vulnérabilité, I la résilience, enfin t et s décrivent les dimensions spatio-temporelles.

Risque de crue

Le risque d'inondation et de crue est défini souvent comme un fait dommageable, produit d'une part par un aléa d'ordre hydrométéorologique et d'autre part de la vulnérabilité sociétale, ces deux dernières dimensions évoluent dans le temps et dans l'espace. La littérature est riche en définitions concernant ce type de risque. Le risque de crue et d'inondation est défini comme « *un phénomène dynamique et plus ou moins paroxysmique, limité dans le temps et dans l'espace, qui se traduit par la submersion sous des eaux de crue de tout ou partie de ce territoire que représente la plaine inondable* » (Lambert et al, 2000). Ce phénomène griffe l'espace géomorphologique et laisse des empreintes sur le territoire, il marque aussi la mémoire de la population « *cette dynamique morphogénique actuelle fait de la plaine inondable un espace géographique particulier, lieu d'une dynamique qui conditionne le modèle, le passage de la plaine, mais aussi d'une interaction intense entre dynamique des crues inondantes et activités socio-économiques forte* » (Lambert et al, 2000). Le risque de crue et d'inondation est une problématique fondamentalement géographique, « *un élément d'une infrastructure régionale dans la mesure où il influence le développement et l'organisation des territoires en tant que facteur limitant par les impacts passés, actuels ou potentiels des manifestations*

hydrologiques mais également en tant que porteur de développement en raison des effets bénéfiques que constituent les zones inondables [...]. Enfin, au-delà de sa matérialité, l'inondation est également un élément du vécu quotidien qui peut être appréhendé comme un objet perçu, interprété, médiatisé » (Scarwell et Laganier, 2004). En plus de facteur météorologique, les fortes précipitations qui conduisent à la formation du ruissèlement et des crues, s'ajoutent les aléas hydrographique, hydrologique et hydraulique (Arnaud Fassetta, 2009) qui conduisent à la naissance du risque d'inondation et de crue particulièrement en milieu exposé à une forte urbanisation telle les plaines. Pour faire face à ce type de risque, il est recommandé de caractériser ces composantes et d'étudier la vulnérabilité des zones exposées.

Facteurs anthropiques modifiant l'écoulement des eaux

En résumé, les effets de l'anthropisation sur le cycle de l'eau dans un bassin-versant sont la modification de l'écoulement des eaux et l'imperméabilisation. La première conséquence directe de la diminution de la perméabilité des sols est l'augmentation des volumes d'eaux ruisselants en surface. Cette imperméabilité des sols limite fortement l'infiltration de l'eau dans le sous-sol, elle est aussi à l'origine de la génération d'autres phénomènes que l'augmentation des volumes d'eaux ruisselant en surface, telle la défaillance en réalimentation des nappes phréatiques. Compte à la modification de l'écoulement de l'eau, le réseau hydrographique naturel est remplacé par un réseau artificialisé doté d'un tracé direct, surdimensionné en amont, à pente très favorable aux écoulements. Le réseau aménagé est conçu dans le but de diminuer au mieux son diamètre et sa longueur (moins de coûts), ainsi que son ensablement (Chocat, 1997). Cette artificialisation a comme conséquences directes une accélération du ruissellement due à la réduction des forces de frottement (Desbordes, 1989), une importante augmentation du débit de pointe et une diminution du temps de réponse. Le bassin-versant est rendu beaucoup plus sensible et plus vulnérable aux événements météorologiques autrefois ne causaient pas de dégâts (Desbordes, 1994), par des pratiques anthropiques telles l'extension du réseau routier qui modifie considérablement les écoulements superficiels. Ce réseau routier se comporte comme un véritable canal, quand il est conçu dans le sens de la pente du relief, dans lequel les écoulements peuvent atteindre des vitesses importantes, du fait de sa faible rugosité et son imperméabilité. Par contre, il réagit comme un obstacle lorsqu'il est perpendiculaire au relief: on assimile alors son rôle à celui d'une digue de rétention qui change le sens naturel qu'empreinte l'eau, et le force à suivre un passage obligatoire.

5.2.2 Les phases de gestion de risque d'inondation

La gestion du risque se décompose en plusieurs étapes, plusieurs temps d'analyse et d'action. Chacune d'entre elles a des domaines et des exigences propres en termes de zones considérées et de fréquence de réactualisation des informations. Souvent représentées et organisées de façon cyclique, Jean-

Baptiste Henry (2004), dans son étude sur les systèmes d'information spatiaux et leurs contribution pour la gestion du risque d'inondation de plaine, a détaillés les grandes étapes de gestion:

La prévision, qui est le processus amont fondé sur la modélisation des phénomènes et l'observation régulière de variables représentatives, comme la modélisation des quantités de précipitations reçues dans un bassin hydrographique et de leur effet sur l'écoulement des cours d'eau.

L'anticipation, qui commence dès que les variables atteignent des valeurs définies comme pouvant conduire à des conséquences graves (seuils de pré-alerte, d'alerte...). Elle permet de préparer les moyens de réponse si la prévision d'évolution vers une situation de crise se confirme.

La gestion de crise, qui a pour but d'assurer la sécurité des biens et des personnes en gérant l'événement en cours.

La mitigation, qui a pour objectif de réduire les conséquences de l'événement grave qui vient de se dérouler. Cette étape inclut notamment les opérations de nettoyage, de déblaiement, de remise en état des voies de communication.

Le retour d'expérience, qui se définit comme un processus de réflexion mis en œuvre pour tirer les enseignements positifs et négatifs, il permet de reprendre le déroulement de l'événement et des décisions prises pour le gérer et de valoriser les informations acquises pendant la crise, d'évaluer les réponses qui ont été apportées pour améliorer la qualité des interventions.

La prévention, qui tire les conséquences des expériences passées et formule des recommandations pour limiter les effets d'un événement similaire dans l'avenir.

5.2.3 Les outils de cartographie de l'aléa inondation

Différents techniques à savoir les relevés sur le terrain, les différentes formes de télédétection et la modélisation hydraulique sont mise à profit pour cartographier l'étendue d'une inondation et estimer les hauteurs de submersion des zones inondées. Certains de ces outils présentent des limites, malgré leurs avantages respectifs.

5.2.3.1 Les relevés sur le terrain

La méthode la plus répandue, qui permette d'obtenir des données nécessaires pour étudier un phénomène spatial quelconque et valider des résultats d'un modèle, est le relevé direct sur le terrain. L'acquisition de ces données, une à une sur le terrain, est une méthode fiables. Cependant, l'accès aux zones inondées peut être problématique et le danger pour les arpenteurs, personnes en charge des relevés, peut être élevé. Compte à l'échantillonnage spatial réalisé sur le terrain, peut-être mal distribué, il ne couvre pas souvent la totalité de la zone étudié, ce qui diminue la précision des informations sur la localisation des zones inondées. (Townsend et al., 1998 ; Lang et al., 2008). Enfin, les temps nécessaires à l'acquisition des données sur la zone, à leur traitement puis à la production de

la carte thématique d'inondation constituent une limite majeure, et sont souvent trop longs pour que cette technique soit réellement pratique.

5.2.3.2 La modélisation hydraulique

Les modèles hydrauliques d'inondation sont employés pour la simulation numérique des crues hypothétiques ou réelles, dans le but de comprendre, analyser et gérer ce phénomène (Hostache, 2006). Ces modèles permettent de simuler, pour un débit connu, les niveaux d'eau des zones inondées, l'étendue de ces zones et dans certains cas les durées de submersion et les vitesses d'écoulement. (Neal et al., 2010). Les facteurs influençant les écoulements en milieu urbain sont nombreux (les bâtiments et constructions, de murs, etc). Ce qui rendent la dynamique des écoulements très complexe par rapport au milieu rural où les écoulements de surface sont généralement gouvernés par la topographie naturelle du milieu, facteur principale, et par le type de couverture du sol (présence ou non de végétation), (Haider et al., 2003; Mason et al., 2010). Les effets de ces facteurs sur les écoulements de surface doivent d'abord être identifiés, modélisés puis intégrés à la modélisation hydraulique à l'aide de données spécifiques. Ces données doivent être récentes et précises car elles vont servir à paramétrer et contraindre les conditions du modèle hydraulique. Ce volume important de données peut parfois être difficile de collecter et dont le coût est potentiellement élevé. L'obtention d'informations relatives à l'étendue de l'inondation grâce à la modélisation hydraulique ne semble être envisageable que si l'ensemble des données nécessaire est déjà disponible, ou si un modèle hydrographique d'inondation a déjà été calibré pour la même zone. Il est important de souligner que la modélisation hydrographique ne permet d'obtenir qu'une simulation des caractéristiques de l'inondation, ce qui entraîne une part d'incertitude.

5.2.3.3 La télédétection optique

La télédétection optique permet l'acquisition des images en utilisant le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les surfaces détectées, elle opère dans les bandes du visible et du proche infrarouge. Soit par des dispositifs aéroportés ou satellitaires. La télédétection optique aéroportée est une source de données fiable pour la cartographie de l'étendue des zones inondées, elle permet d'obtenir des images de haute résolution spatiale, dont l'interprétation est relativement aisée. (Mallinis et al., 2011). Les acquisitions se font généralement à très basse altitude, sous le couvert nuageux pour éviter toute nébulosité dégradant la qualité des images optiques aéroportées. Néanmoins, l'utilisation de ce type de télédétection est limitée par le temps nécessaire à leur acquisition et surtout par les coûts élevés de ce type de données. Elle est donc limitée à des zones inondées de petite à moyenne taille (Puech et al., 2002). un autre critère défavorable peut s'ajouter, les conditions météorologiques, qui empêchent le survol des zones inondées. Compte aux capteurs optiques satellitaires, ils ont permis non seulement d'améliorer l'accès aux données nécessaires à la cartographie des inondations, mais aussi à un coût relativement moins élevé que celui de la photographie aérienne (Brivio et al., 2002). Les satellites lancés au cours de la dernière décennie

telle que Pléiades 1A et 1B, GeoEye-1 ou WorldView 1, 2 et 3, disposent des capteurs de très haute résolution spatiale, inférieure à 1 mètre, ce qui permet l'identification précise des zones inondées. C'est une avancée passionnante par rapport aux plus anciens capteurs optiques dont la résolution spatiale est ou était de l'ordre de dizaines de mètres (Van der Sande et al., 2003). Cependant, lors des inondations, l'acquisition de données de qualité est souvent réduite par la présence d'un couvert nuageux important, vu que les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge ne pouvant pénétrer les nuages (Horritt et al., 2003; Marti-Cardona et al., 2010; Schumann et al., 2011). Le type de couverture du sol, particulièrement les zones sous un couvert végétal dense, ne permet pas non plus à l'imagerie optique satellitaire de détecter les zones inondées, ce qui rend difficile de trouver l'information recherchée dans certaines zones (Hess et al., 1995; Sanyal et al., 2004).

5.2.3.4 L'apport des techniques spatiales

L'inondation est un phénomène spatial, susceptible d'affecter de vastes surfaces naturelles et urbaines, son étude nécessite de disposer des données adéquates, géolocalisées. Notre travail est centré sur l'apport des techniques spatiales à l'étude de ce risque. Les paramètres accessibles par l'observation de la terre ont permis d'envisager son utilisation avant, pendant ou après l'inondation. Dans notre étude, l'étape de prévision et d'anticipation sera privilégiée pour pouvoir prévenir le risque et réduire son impact sur les biens et les personnes. La forme numérique des données de télédétection autorise un traitement par les outils informatiques d'analyse spatiale, ainsi que leur couplage et leur croisement avec d'autres sources d'information géographique. L'exploitation des données satellitaires dans la phase de prévision et d'anticipation consiste à fournir des plans d'information, des données de base utilisables par des modélisations ou permettant d'en valider les résultats. Les grands intérêts des images satellitaires sont tout d'abord une acquisition très rapide d'information sur de très vastes territoires, mais aussi de permettre d'accéder plus aisément à des variables spatialisées à différentes échelles (Dubayah et al., 2000 ; Droogers et Kite, 2002). Parmi les nombreuses possibilités offertes par la télédétection figure la détermination du niveau d'eau à partir de l'imagerie radar, une application est faite sur un fleuve en Gambie pour une prévision des crues à partir de données de radars altimétriques (Jean-Pierre Lamagat, 2003). Les données acquises par télédétection sont liées aux processus globaux et locaux intervenant dans le fonctionnement du bassin versant comme les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement, l'érosion des sols, la recharge souterraine. L'intégration de ces données dans les modèles hydrologiques occupe une vaste place dans de nombreuses recherches. La donnée satellitaire est utilisée pour caractériser le bassin versant et suivre les évolutions spatio-temporelles des zones saturées dans le bassin ou du changement dans l'utilisation et la couverture du sol, les études d'urbanisation et d'étalement urbain... Ainsi, les paramètres majeurs accessibles par l'imagerie spatiale ont fait l'objet de développements et d'assimilation dans les modèles hydrologiques (la lame d'eau précipitée, l'humidité et l'occupation du sol, le modelé du terrain).

5.2.3.5 L'utilisation des Modèles Numériques de Terrain en hydrologie

L'apparition d'un nouveau moyen de représenter la Terre : le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de la cartographie numérique, avec le développement de l'informatique, ont aidé à modéliser, analyser et représenter des phénomènes liés à la surface topographique. Depuis que l'on utilise l'information topographique sous forme de MNT (sous la forme de grilles de données altimétriques), au lieu de courbes de niveau, la modélisation hydrologique a été transformée. Le traitement des informations est fortement simplifié puisqu'il devient numérisé, il est devenu possible d'obtenir la pente des terrains avec la dérivée première des MNT. Cependant l'introduction de cet outil a également amené un certain nombre de questions. Une d'entre elles est l'influence de sa résolution sur la densité de drainage finale. Une autre concerne les hypothèses de calcul faites lors de la modélisation des réseaux hydrographiques, où le choix d'un seuil hydrographique est une question critique qui a fait l'objet de nombreuses études depuis les travaux de Tarboton et al., 1991. Ce seuil est décrit plus loin.

Pour décrire l'espace et des chemins de l'eau dans les milieux périurbains, la méthode de référence de l'hydrologie rurale s'appuie sur le MNT. A partir de la topographie uniquement, elle permet de déterminer le réseau hydrographique. Cette méthode présente l'avantage de nécessiter peu de données d'entrée, et d'être facile et rapide à mettre en œuvre. La modélisation des réseaux hydrographiques nécessite des MNT détaillés et de bonnes qualités. La question qui se pose par rapport à ce type de modélisation demeure toutefois de savoir à quel point le MNT est suffisamment précis pour bien représenter le réseau hydrographique réel. Le MNT sera qualifié hydrologiquement acceptable lorsque la modélisation du réseau hydrographique est similaire au réseau réel.

Dans une analyse bibliographique sur l'utilisation des MNT en hydrologie, une première partie est dédiée à la présentation des MNT, de leur diversité en matière de mode de construction et de représentation, ainsi que de leur intérêt dans de nombreuses applications. La deuxième partie présente les utilisations des MNT dans certaines modélisations hydrologiques, notamment pour l'extraction du réseau hydrographique. L'objectif de cette étude est d'actualiser le réseau hydrographique reconnu au niveau de la direction de ressource en eau par comparaison du réseau digitaliser à partir des cartes topographiques (réseau référentiel) et celui extrait à partir du MNT, le résultat n'est pas concluant car il nécessite un travail de validation important sur le terrain qui a été réalisé par des relevés GPS.

5.3 Modèle Numérique de Terrain

Le terme Modèle Numérique du Terrain tient son origine du professeur Charles L. Miller, de l'institut Technologique du Massachusetts dans les années 1955-1960. Miller donna en 1958 la première définition du MNT. Il a précisé que le MNT est une représentation statistique d'une surface continue du terrain par un grand nombre de points choisis et dont les coordonnées X, Y et Z sont connues. Le MNT est une représentation numérique du terrain en termes d'altitude ; il fournit des renseignements sur la forme et la position de la surface topographique pour une zone géographique donnée. Il sera

donc défini relativement à un système d'altitude et un système cartographique spécifiques. Ces données peuvent être acquises par l'intermédiaire de l'imagerie satellite, des moyens aéroportés ou grâce à des mesures sur le terrain. Il permet ensuite de construire un modèle conceptuel riche employé dans de nombreuses applications analysant des processus liés à la surface topographique (Peucker et al., 1975). Dans la grande majorité des cas, le MNT est une représentation spatiale de la réalité, il est représenté comme un ensemble de mailles régulières, caractérisées chacune par une valeur d'altitude, dans le but d'en faciliter la manipulation et le stockage en mémoire de l'ordinateur pendant les calculs. Le MNT reste l'une des plus importantes sources de données utilisées pour l'extraction de nombreux paramètres utilisés tels que la pente, la direction d'écoulement de l'eau, l'indice topographique, etc.

Le relief est un phénomène géographique quantitatif spatialement continu. Il présente des valeurs distinctes en chaque point de l'espace. L'altitude d'un point quelconque sera alors calculée par interpolation ou extrapolation à partir des altitudes connues des points voisins : les altitudes sont dites alors distribuées (Laurini & Milleret-Raffort 1993). La fonction mathématique d'interpolation ou d'extrapolation est choisie pour reproduire à partir de l'échantillon les informations altimétriques nécessaires à une application donnée, et si possible pour un maximum d'applications différentes. L'échantillon des points X, Y, Z constituant la donnée initiale peut être une image matricielle du relief, avec Z l'altitude du point de coordonnées planimétriques (X, Y) dans une projection définie (Julie Charleux-Demargne 2001).

Pour un MNT, la résolution est une notion fondamentale. On distingue deux types de résolution, une résolution planimétrique, appelée également résolution spatiale, relative à la position planimétrique de deux points. Une résolution altimétrique, relative à l'unité de mesure des valeurs d'altitude. Cette dernière varie d'un MNT à l'autre, elle est généralement de l'ordre de quelques mètres ou bien souvent inférieure, de l'ordre décimétrique ou centimétrique suivant le mode de mesure de l'altitude. Il faut noter que ces deux résolutions définissent la qualité du MNT.

Il est important de ne pas confondre le MNT avec le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) qui est une modélisation du sursol (bâtiments, végétation, infrastructures routières, etc.). Pour différencier les modèles suivant l'information fournie, différents termes, prêter à confusion, peuvent être attribués aux modèles numériques obtenus ou disponibles. Suivant la technique de construction du MNT, celui-ci représentera uniquement le sol nu, ou bien le sol ainsi que de tous les objets au-dessus du sol : bâtiments, végétation, etc., que l'on appellera sursol ; dans ce cas, l'altitude renseignée par le MNT est celle du toit de l'ensemble des objets de la surface topographique. Certains auteurs emploient le terme MNT, Digital Terrain Model (DTM) en anglais, lorsque le modèle informe sur les altitudes de la surface topographique sans les éléments du sursol, qu'ils différencient du terme Modèle Numérique de Surface (MNS) lorsque le sursol est pris en compte dans l'information altimétrique. Pour notifier que le modèle est utilisé pour sa seule information altimétrique, sont également employés les termes de :

Modèle Numérique d'Élévation (MNE) ou encore Modèle Numérique d'Altitude (MNA), Digital Elevation Model (DEM) en anglais (Julie Charleux-Demargne 2001). Par la suite, nous conserverons le seul terme générique de MNT en spécifiant quelle est l'information altimétrique fournie par le modèle.

5.3.1 Importance des MNT et multiplicité de leurs utilisations

Les MNT sont utilisés pour effectuer une représentation informatique du relief. Cette représentation constitue un élément indispensable dans plusieurs domaines d'application, tels que la construction de voies de communication, la visualisation tridimensionnelle de sites, la simulation de vols, l'analyse et l'interprétation de la morphologie de terrain, la modélisation de phénomènes liés au relief etc. En particulier, à partir du plan de base d'information altimétrique correspondant au modèle géométrique, de nombreux paramètres peuvent être extraits comme futurs éléments du modèle conceptuel. Le calcul de dérivées premières permet de définir les plans de pente et d'azimut, ceux de dérivées secondes définissent les plans de courbure ; ensuite, des calculs plus complexes peuvent permettre de construire des plans thématiques tels que les crêtes, les talwegs, les limites des bassins versants. Les MNT sont utilisés dans de nombreuses applications en sciences de la terre et en ingénierie. Leurs premières utilisations remontent aux années 1950. La seule application du MNT durant cette période concernait les tracés de routes (tracés de profils du terrain et calcul de courbures).

Les MNT se sont avérés être une méthode importante pour la modélisation et l'analyse des données topographiques spatiales. Leurs domaines d'application sont variés. Les MNT se sont avérés être une méthode importante pour la modélisation et l'analyse des données topographiques spatiales. Leurs domaines d'application sont variés. Ils sont intégrés dans des systèmes d'information géographique pour être exploités en génie civil, où les ingénieurs sont principalement intéressés à utiliser les MNT pour faire face aux problèmes concernant la conception des routes, la planification des sites et le calcul volumétrique des barrages. Aussi en sciences de la terre, où les applications géo-scientifiques se concentrent principalement sur des fonctions spécifiques pour la modélisation, l'analyse et l'interprétation de la morphologie du terrain. Celles-ci peuvent inclure la simulation, la classification géomorphologique et la topographie géologique. En géologie, la production des profils de pente pour créer des cartes ombragées est une utilisation populaire qui fait usage du MNT. Les applications caractérisant mieux le domaine de planification et gestion de ressources, incluent l'emplacement des sites, les modèles d'érosion de sol et les modèles potentiels de dispersion de la pollution. Le domaine militaire est non seulement un principal consommateur des MNT mais il est également un producteur significatif. Presque chaque aspect de l'environnement militaire dépend d'une compréhension fiable et précise du terrain, de l'altitude et de la pente de la surface de la terre. L'utilisation militaire des MNT combine les méthodes de tous les domaines d'application précédents et leur objectif final est très spécialisé, par exemple : l'analyse de l'intervisibilité pour la gestion de champ de bataille, l'affichage

en trois dimensions pour les systèmes de contrôles d'armes, la simulation de vol et la préparation de missions sur des régions d'accès difficiles.

L'analyse d'ordre géomorphométrique peut être de deux formes d'après Evans (1972), soit pour extraire des caractéristiques définies pour toute surface rugueuse et c'est relatif à la géomorphométrie générale, soit en rapport à des éléments topographiques d'une application particulière et c'est relatif à la géomorphométrie spécifique. De nombreux paramètres spécifiques au domaine de l'hydrologie sont donc extraits à partir des MNT et intégrés par la suite dans un SIG pour être exploités par la suite à une application. Les dérivations de premier ordre du plan altimétrique permettent de calculer les pentes et les azimuts. La pente est une des données fondamentales à partir de laquelle le réseau hydrographique sera déterminé. Les dérivées secondes nous renseignent sur les courbures du terrain. L'ensemble de ces informations représente les plans dérivés du MNT. L'hydrologie cherche à déterminer le chemin de l'eau, le réseau hydrographique, qui correspond localement à la ligne de plus grande pente. L'hydrologie s'intéresse particulièrement aux problèmes de pente et d'orientation. Un plan tangent à la surface du MNT soit définit, en un point, et son vecteur normal qui est caractérisé par la pente et l'azimut. La pente, *slope* ou *gradient*, est égale à l'angle, dans un plan vertical, entre le vecteur normal et l'axe des Z. L'azimut, également appelé exposition, *aspect* ou *exposure*, est l'angle dans le plan horizontal entre le vecteur normal et une direction de référence; dans les SIG, un angle polaire relatif à l'axe des X est généralement utilisé.

5.3.2 Modélisation hydrologique

On appelle modèle une représentation qui décrit les relations entre les différents éléments d'un système. La modélisation des phénomènes naturels a pour objectif la représentation abstraite de ces phénomènes et l'amélioration de leur compréhension, afin de pouvoir analyser l'environnement et définir les actions à entreprendre (Julie Charleux-Demargne 2001). La modélisation d'un système donné permet de faire avancer la compréhension du fonctionnement du système modélisé et de prédire des états futurs du système en fonction de différentes sollicitations (mode prédictif, modification des variables d'entrée) ou d'évaluer la réponse du système à différents scénarios d'usage de ce dernier (mode gestion ; variations des paramètres et des conditions frontières).

Les champs d'application de la modélisation sont aussi divers que les champs de la connaissance. En hydrogéologie, un modèle hydrologique est une représentation simplifiée du cycle de l'eau à l'échelle de bassin versant, afin d'expliquer la réponse du bassin aux différentes conditions auxquelles il est soumis. Il est constitué de variables d'état pour la description du bassin, de variables d'entrée pour la description de son environnement et de variables de sortie pour la description du problème, et définit des relations mathématiques paramétrées entre ces variables. Parmi les facteurs caractéristiques de la modélisation hydrologique, mentionnons : la diversité des processus en jeu (des processus physiques et chimiques), la complexité des systèmes étudiés, la présence de multiples échelles tant spatiales que

temporelles, la difficulté de procéder à des mesures extensives et dans des conditions variées. Cette complexité inhérente à la modélisation hydrologique implique qu'il n'existe pas une mais de multiples modélisations possibles et que le lien entre le modèle et l'objectif de son application est particulièrement important (Villeneuve et al, 1998) Autrement dit, il n'existe pas de modèle universel applicable sans discernement. Un modèle hydrologique permet de connaître le fonctionnement d'un bassin versant, prévoir des débits en fonction de scénarios météorologiques ou d'aménagement, simuler des débits sur des cours d'eau où les mesures sont insuffisantes, modéliser le transport de polluants. La qualité du modèle est jugée à partir de la justesse des réponses et de ses prédictions concernant le problème posé.

La topographie est essentielle vis à vis les écoulements. Le ruissellement et le relief sont intimement liés puisque si un écoulement est suffisamment important et fréquent, il finira par sculpter le paysage et donc se traduira morphologiquement par un talweg (Depraetere & Moniod 1991) et inversement, la trajectoire de l'eau est dépendante de la topographie.

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage (Biswas, 1999). Le temps de concentration T_c , qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : en premier lieu, la taille du bassin (sa surface), sa forme, son relief, sa pente longitudinale et son orientation. A ces facteurs s'ajoutent encore la lithologie des terrains et la nature des sols, le couvert végétal et les caractéristiques du réseau hydrographique. Les caractéristiques morphologiques (surface, longueur, largeur, périmètre, forme, relief, pente) et les indices morphométriques du bassin versant sont indispensables pour caractériser son environnement physique et leurs influences sur l'écoulement superficiel. Ces facteurs, de nature purement géométrique ou physique, peuvent être extraits facilement par des techniques automatiques en faisant appel aux techniques digitales des SIG et aux MNT.

5.3.3 Utilité de la télédétection en hydrologie

La télédétection environnementale satellitaire joue un rôle essentiel dans l'observation des composantes hydrologiques clés telles que la précipitation, l'humidité du sol, l'évapotranspiration et le stockage total de l'eau à l'échelle mondiale, elle apparaît comme une technique prometteuse utilisée pour collecter des informations sur le territoire dans le domaine de l'eau (Yang Hong et al, 2016). Dans le domaine de l'hydrologie, elle représente un moyen de recueillir des informations valables et pertinentes sur les bassins versants et de caractériser un contexte spatial. Elle offre à une date donnée une vision globale de l'environnement, de ses objets géographiques ainsi que de son organisation. Elle permet d'analyser l'évolution temporelle d'un phénomène en combinant des images prises à différentes dates. L'information spatiale fournie sur de larges zones est homogène en terme de format, de

résolution spatiale et de précision et acquise dans un temps relativement court. Elle permet de définir des paramètres pertinents, elle limite les incertitudes sur la paramétrisation du modèle et enfin améliore la transposition du modèle grâce à des descripteurs géomorphologiques (Gineste 1998).

En hydrologie, l'état hydrique du sol joue un rôle très important dans la genèse des écoulements, en particulier dans le partage de la pluie entre ruissellement, évaporation et infiltration. Une prise en compte correcte des processus de surface et en particulier une bonne gestion du bilan hydrique des sols est donc indispensable en hydrologie, surtout si l'on s'intéresse à la prévision et à la gestion des risques de crues. Les instruments spatiaux évoluent et peuvent être élaborés en fonction des problèmes spécifiques de gestion de l'eau. L'estimation par télédétection de l'état hydrique des sols a fait l'objet de nombreuses recherches. En effet, l'état hydrique du sol est une variable clé pour les sciences étudiant notre environnement terrestre telles que la climatologie, l'hydrologie, l'agronomie ou encore la pédologie. Il représente, avec la température de surface, un paramètre essentiel traduisant l'équilibre énergétique entre les surfaces émergées du globe et l'atmosphère. Les gestionnaires sont à la recherche d'outils opérationnels qui leur permettent de suivre l'évolution spatiotemporelle du bilan hydrique, tant à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle régionale. La télédétection couplée aux modèles hydrologiques de prévision des débits sont des outils privilégiés pour répondre à ce besoin (Cécile Loumagne, 1997). Le couplage de la télédétection et la gestion de l'eau suppose donc un travail pluridisciplinaire et nécessite une adaptation entre d'une part les moyens techniques pour obtenir et traiter les données d'observation de la Terre, et d'autre part les modélisations hydrologiques et hydrauliques existantes.

5.3.4 Méthodologie de modélisation du réseau hydrographique à partir du MNT

Le bassin versant est un système complexe qui transforme une pluie incidente en écoulement à son exutoire. Le réseau hydrographique joue un rôle majeur dans la structure organisationnelle et fonctionnelle du bassin versant. Dans le domaine de géomorphologie spécifique, l'une des grandes utilisations des MNT en hydrologie est l'extraction et la caractérisation du réseau hydrographique. De nombreuses méthodes ont été proposées pour extraire automatiquement cet élément hydrologique. Les techniques d'extraction de réseaux à partir de MNT sont aujourd'hui classiques. Elles utilisent la plupart du temps des algorithmes raster avec détection des circulations arborescentes, après avoir éliminé les incohérences hydrauliques du produit initial. Ces réseaux sont cohérents sauf dans les zones peu variables - zones planes ou versants réguliers - où il faut compléter l'information avec des données extérieures - et dans l'amont des bassins par la difficulté d'arrêter le départ de drains au bon endroit. En opposition aux solutions raster, des solutions à partir de format TIN se sont développées pour mieux introduire les contraintes anthropiques ou mieux définir les cheminements à l'amont des bassins.

En théorie, à partir d'un MNT on peut déterminer un réseau de drainage passant par tous les points de l'espace, jusqu'au point le plus amont. En pratique, on ne doit pas remonter le réseau au-delà d'une certaine limite, sous peine de voir les cheminements calculés non conformes à la réalité du terrain. Les solutions classiques arrêtent le tracé sur un critère uniforme de surface amont drainée, parfois modulés en fonction de données externes telles que l'occupation du sol ou la géologie. Ces résultats sont localement incohérents, d'où l'émergence forte actuellement de critères d'arrêt basés sur la courbure locale. Selon cette idée le réseau est dessiné tant que le MNT indique la présence locale de vallons ou ravines, en se basant sur la courbure locale du terrain naturel ou celle des lignes de niveau. Le réseau final est dépendant de la résolution du MNT (Puech, 2010).

La topographie représente le meilleur indicateur des potentiels gravitationnels mis en jeu dans les processus d'écoulement de surface à l'échelle du bassin versant, particulièrement pour des systèmes où le processus de ruissellement de surface est le processus d'écoulement dominant. En tant qu'objet géométrique tridimensionnel, le relief peut être appréhendé par la description des altitudes ou des pentes. Les lieux de changement de pente sont des points singuliers du relief, il s'agit des sommets et des fonds de cuvette. Ces points peuvent également être alignés et constituer ainsi les lignes structurelles comme les lignes d'altitudes minimales dites thalwegs, ou maximales dites lignes de crête. Les thalwegs sont des lignes de concentration des écoulements générés au niveau des versants, puis de circulation vers l'aval. Lorsque l'écoulement dans le thalweg est fréquent, voire permanent, et suffisamment intense, un cours d'eau s'inscrit dans le paysage (Christophe Cudenneq, 2000).

Jusqu'à ce jour, le meilleur modèle numérique d'altitude offrant une couverture mondiale et qui soit libre d'accès était le modèle Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Ce modèle fournit par la NASA et obtenu par un radar embarqué à bord de la navette spatiale américaine a pour mission de représenter le relief du globe terrestre. Ce MNT propose une précision planimétrique d'un pas de 30 mètres et une précision altimétrique de 15 mètres (09 mètres absolu et 06 relatives).

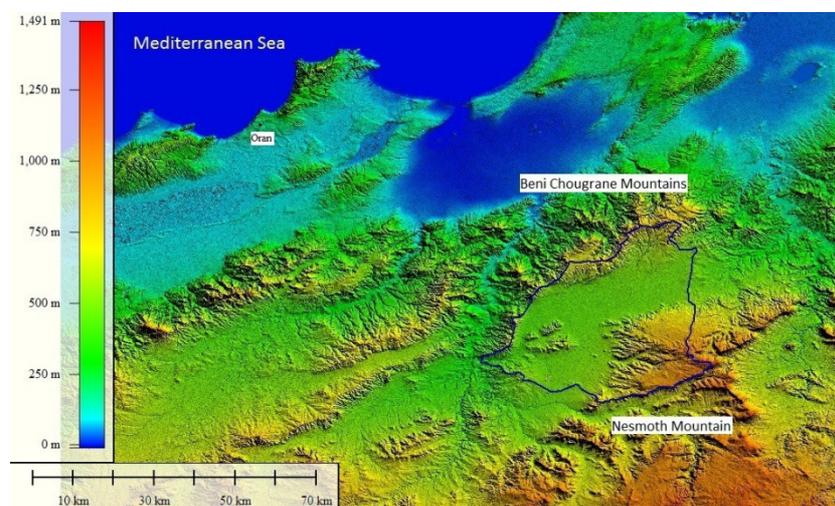


Figure 5.1. Relief de la zone d'étude représenté par MNT de type SRTM.

La modélisation du réseau hydrographique consiste simplement à reconstituer de façon numérique et détaillée le flux de l'eau à la surface. La méthodologie générale de modélisation des bassins hydrographiques utilisée dans notre cas d'étude est basée sur les travaux de Jenson et Domingue (1988). Trois étapes préliminaires de traitement, qui doivent être réalisées de façon séquentielle y sont identifiées :

5.3.4.1 Remplir les dépressions et enlever les pics (Fill sink/remove peak)

L'extraction automatique du réseau hydrographique à partir du MNT est complexe. D'une part, les méthodes de type hydrologique reposent sur l'hypothèse que l'eau s'écoule de manière continue en surface hors des zones endoréiques naturelles et des morphologies de terrain particulières. D'autre part, la détermination des chemins d'écoulements par simulation surfacique des écoulements conduit à des difficultés d'extraction pour deux types de zones du MNT : les dépressions et les zones plates.

Les modèles numériques de terrain contiennent souvent de petites fosses (des cuvettes) et des pics qui sont communément des erreurs provoquées par la résolution des données ou l'arrondissement d'altitudes à la valeur entière la plus proche Planchon et Darboux(2002). Ces fosses empêchent un écoulement correct, les cuvettes doivent être remplies sinon le réseau de drainage dérivé risque d'être discontinu. Dans un MNT, une dépression locale se définit comme une cellule dont les huit mailles voisines sont d'altitude plus élevée ; elle peut être étendue dans le cas d'un ensemble de cellules adjacentes de même altitude. Les dépressions posent problème puisqu'elles piègent l'eau et donc la continuité des chemins d'écoulements n'est plus assurée. Les dépressions et les zones plates sont considérées comme des artefacts du MNT qui doivent être éliminés avant de déterminer les chemins d'écoulements. Pour supprimer les dépressions, il existe plusieurs solutions dont les deux plus utilisées sont l'inversion du chemin d'écoulement des eaux entre le fond de la dépression et son exutoire (Fairfield et Leymarie, 1991) et le remplissage des dépressions par comblement pour déterminer l'exutoire ; cette technique prend le nom « bouche-trous » (Jenson et Domingue, 1998).

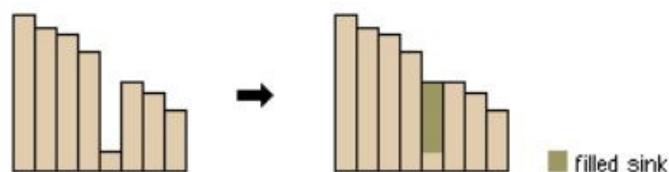


Figure 5.2. Une cuvette à remplir dans le MNT

Les pics, qui sont des cellules fictives dont l'altitude est supérieure à ce qui est attendu par rapport à la tendance de la surface environnante doivent eux aussi être supprimés.

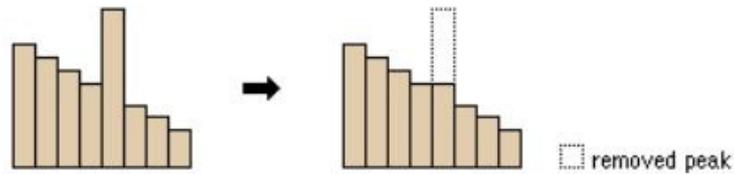


Figure 5.3. Un pic à enlever du MNT

Un MNT dont les fosses ont été remplies et les pics ont été enlevés est produit, toutes les cellules du MNT s'écoulent alors vers une de ses bordures..

5.3.4.2 Directions du drainage (Flow direction)

La détermination des directions d'écoulement est un problème complexe, pour lequel de nombreux algorithmes ont été proposés avec des sophistications importantes. L'approche la plus commune pour extraire le réseau hydrographique à partir d'un MNT de type raster est basée sur le suivi de l'écoulement de l'eau. Cette méthode de type hydrologique s'appuie sur la détermination des directions d'écoulement de l'eau en chaque pixel à partir des valeurs altimétriques du MNT par simulation de l'écoulement de l'eau en surface, sachant que l'eau emprunte le chemin défini par la ligne de plus grande pente.

Les algorithmes de détermination des directions d'écoulement sont de trois types : unidirectionnel, multi-directionnel et bi-dimensionnel. Pour le schéma unidirectionnel, la direction d'écoulement est basée soit sur l'approche de calcul de descente maximale, soit sur l'approche de calcul d'azimut. La méthode basée sur la descente maximale consiste à explorer le voisinage immédiat de la cellule pour calculer les descentes altimétriques entre la cellule centrale et ses huit cellules adjacentes et choisir la cellule aval correspondant à la descente maximale.

La majorité des méthodes d'extraction du réseau hydrographique utilise l'algorithme de (Jenson et Domingue, 1988), d'après l'approche de (Callaghan et Mark, 1984). Cette méthode modélise la direction de flux à partir de chaque cellule vers son voisin de plus grande pente descendante. La sortie de l'outil direction de flux exécutée avec le type de direction de flux -D8 type- est un raster d'entier dont les valeurs sont comprises entre 1 et 255. L'algorithme de détermination de la direction de l'écoulement traite de façon cohérente tous les cas problématiques (les secteurs plats où toutes les cellules adjacentes à la cellule considérée ont la même altitude que celle-ci).

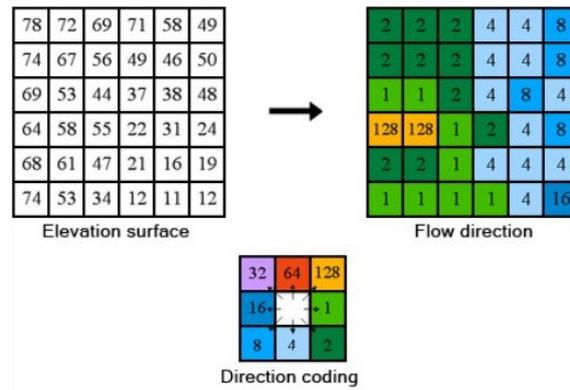


Figure 5.4. Fonctionnement de l'outil Direction de flux selon la méthode D8



Figure 5.5. Carte de direction de flux

5.3.4.3 Accumulations du drainage (Flow accumulation)

Cette troisième étape consiste à calculer, à partir de la carte de directions du drainage, le nombre de cellules du MNT qui se drainent vers une cellule donnée. Le réseau hydrographique peut être modélisé par la suite en fixant un seuil sur la carte d'accumulation du drainage. La surface drainée est le critère le plus communément utilisé pour différencier les pixels du réseau de ceux du versant et extraire un réseau hydrographique à partir d'un MNT. Cette méthode de (Jenson & Domingue 1988) utilise un critère hydrologique basée sur un seuil de surface amont drainée. Pour déterminer la valeur du seuil hydrographique, une étude bibliographique sur la superficie à partir de laquelle l'eau s'accumule et le ruissèlement s'accroît, dans les régions semi-arides, est effectuée. La densité de drainage d'un réseau hydrographique est sensible, en plus de la valeur du seuil, à la résolution du MNT. La valeur de seuil est inversement proportionnelle à la densité du réseau, un seuil faible ou une résolution élevée font augmenter la densité de drainage.

Soit un bassin de superficie S couvert par un MNT de résolution s (s taille des mailles élémentaires du MNT, $s \ll S$). Soit S_r le seuil à partir duquel le ruissèlement s'accroît. Si S_r est égal à s l'ensemble du bassin appartient au réseau. Inversement, si S_r est supérieur à S aucune maille du MNT n'appartient au réseau. Ces deux cas limites étant sans intérêt, il faut donc rechercher le seuil S_r compris entre s et S permettant de restituer de la façon la plus objective possible le réseau hydrographique. Lorsque l'on fait varier le seuil S_r de S à s le réseau devient de plus en plus long et ramifié (Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier, 1990).

...

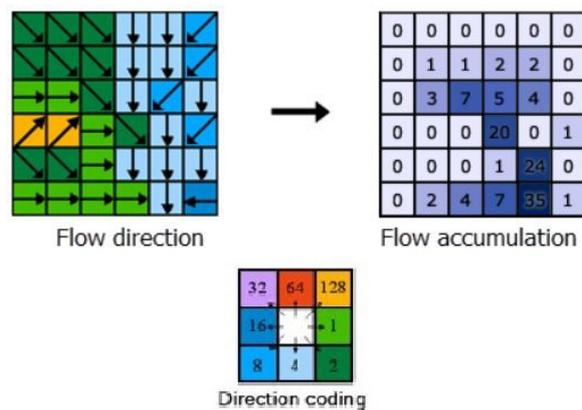


Figure 5.6. Fonctionnement de l'outil Accumulation de flux

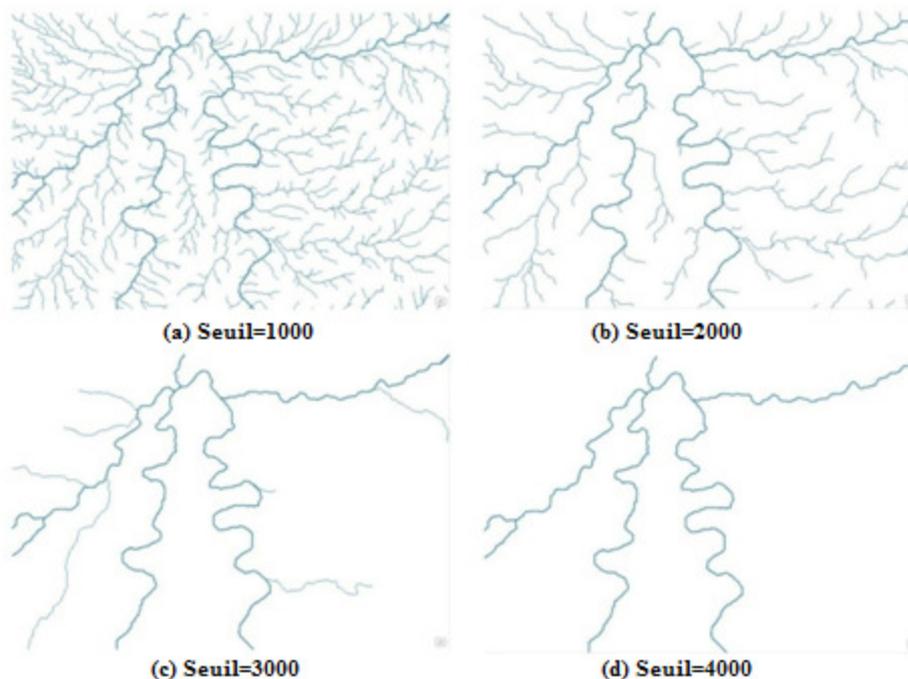


Figure 5.7. Réseau hydrographique généré par plusieurs seuils

Pour une zone à climat semi-aride caractérisée par une forte aridité de son sol, notre travail consiste à extraire plusieurs réseaux pour différentes valeurs du seuil de surface amont drainée et les comparer à

un réseau de référence afin de définir un seuil optimal qui peut être utilisé pour l'étude des autres bassins similaires. Ce seuil peut être défini soit en nombre de pixels amont drainés, soit en surface amont drainée :

$$\text{Seuil}_{\text{surface}} = \text{Seuil}_{\text{pixel}} * \text{Résolution}$$

Avec $\text{Seuil}_{\text{surface}}$ le seuil hydrographique exprimé en surface amont drainée (m^2), $\text{Seuil}_{\text{pixel}}$ le seuil hydrographique exprimé en nombre de pixels amont drainés, et la résolution du MNT en m^2 .

D'après les résultats obtenus on a remarqué que la densité de drainage est inversement proportionnelle à la valeur du seuil de la surface amont drainée choisi.

Tableau 5.1 : La relation entre la superficie drainée et la densité du réseau hydrographique.

Résolution MNT	Nombre de pixels	Superficie Drainée (km^2)	Résultat sur la figure 5.7
30*30	1000	0,9	(a)
	2000	1,8	(b)
	3000	2,7	(c)
	4000	3,6	(d)

5.3.5 Réseau hydrographique de référence

Le réseau hydrographique référentiel, est celui aménagé dans la plaine de Ghriss, obtenu à partir de la numérisation des cartes topographiques au 1/25 000 de l'IGN et de l'imagerie spatiale, reconnue par les autorités locales. La comparaison des deux réseaux hydrographiques, référentiel et SRTM, rend possible la détection des zones où l'aménagement sur terrain est insuffisant pour drainer le volume d'eau ruisselé, ce qui permet de détecter les zones inondables.

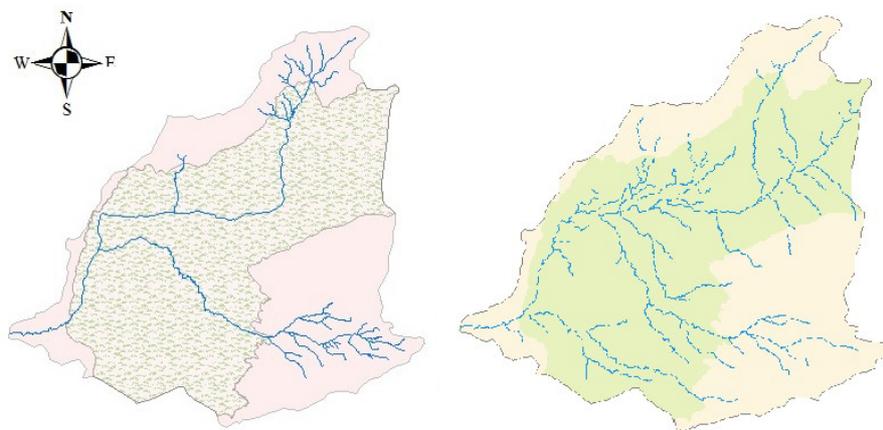


Figure 5.8. (a) Réseau hydrographique référentiel (b) Réseau hydrographique SRTM

En choisissant un seuil hydrographique optimal, même si la valeur de la densité de drainage correspond le mieux à la réalité, des erreurs sur l'emplacement du réseau persistent. En effet, de

nombreuses divergences existent entre le réseau de drainage produit par le SRTM et le réseau référentiel. Si le réseau de drainage est relativement fidèle au tracé des cours d'eau dans les zones où le relief est accentué, il présente de nombreux écarts, et ça dégénère là où le relief est faible. Le réseau extrait à partir de MNT dans les zones montagneuses, où l'altimétrie change fortement est fiable. Nous avons créé une zone tampon de 10 mètres du réseau référentiel pour vérifier la précision dans deux zones différentes. L'une située en amont du bassin versant (Montagne de Nesmoth), l'autre en aval, appelé trois rivières. L'examen d'une portion de cette superposition montre que les réseaux sont pratiquement confondus en planimétrie. L'ensemble du réseau extrait automatiquement est inclus dans la zone tampon, il est même superposé sur le réseau référentiel. Le réseau généré avec le seuil 2000 donne des résultats proches aux résultats du réseau de référence.

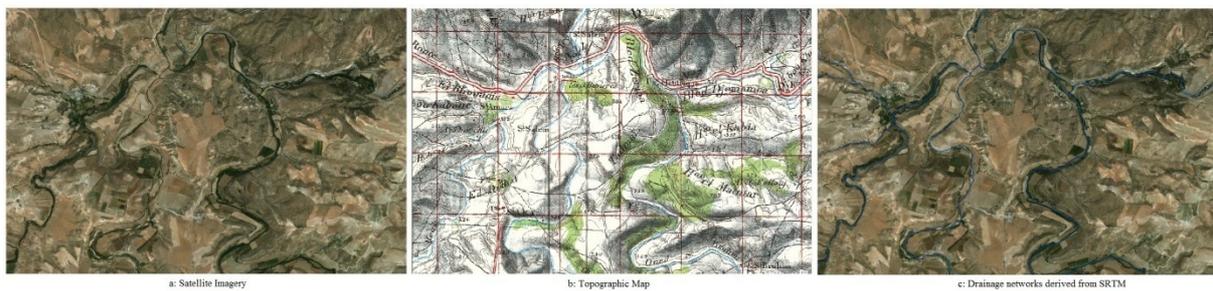


Figure 5.9. zone teste trois rivières

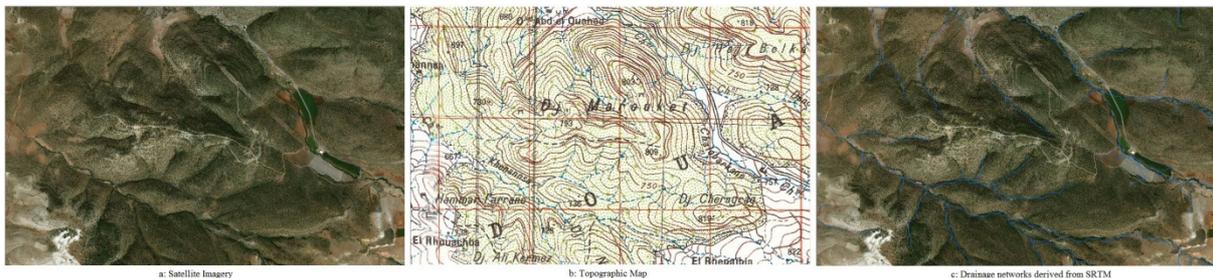


Figure 5.10. zone teste montagne de Nesmoth

5.3.6 Délimitation des zones inondables

Les zones dans lesquelles les inondations sont incontournables chaque année ont été recensées. Ces zones testes servent à comparer le réseau hydrographique aménagé et le réseau modélisé. Une rétrospective des inondations des dernières années dans la plaine de Ghriss montre que certains évènements pluviométriques exceptionnels causèrent des dégâts considérables en milieu récemment urbanisé. Aux aléas climatiques s'ajoute une forte vulnérabilité liée au site, aggravée par des modes d'urbanisation anarchiques ou inappropriés, aussi l'extension du réseau routier joue un rôle indéniable dans l'aggravation des risques liés aux inondations. En janvier 2017 Les crues ont atteint des niveaux très élevés de 1,5 m de haut, ça été de jamais vu depuis 20 ans, des paysages complètement dévastés, submergés par les eaux boueuses, même si l'eau se retire, elle laisse sur place des quantités de boue

importante qui rendent beaucoup de routes impraticable. Les Oueds sont traversés par des routes sans ponts, créant une rupture artificielle de pente, comme c'est le cas de l'oued Fekan à son intersection avec la double voie reliant la ville de Ghriss et la route nationale 06, l'hôpital de Ghriss non plus n'a pas été épargné, les eaux qui viennent des champs avoisinants stagnent dans la cuvette où se trouve implanté l'hôpital.



Figure 5.11. L'hôpital de Ghriss envahi par les eaux pluviales. (Janvier 2017)

Le village agricole Sidi Hamou à Khessibia a été également inondé après que l'Oued de Sidi Daho qui transite par ces lieux a sorti de son lit pour envahir plusieurs maisons. D'autres cas d'inondation ont été enregistrés au niveau de Kherarza où d'importantes productions de légumes furent emportées par les eaux sur plusieurs mètres tout le long de la route reliant le douar à Matemore et Ghriss, ainsi que la route nationale 06 à hauteur de la commune de Froha. La RN 14 fut également fermée à la circulation sur un sens au niveau du lieu-dit Karache à cause des inondations. La ville de Tighenif a connu ce désagrément au niveau de la cité LSP plus connue sous le nom du Souk. À Ain Fekan, une dégradation des trottoirs, des piliers d'éclairage public et les bâtiments ont été affectés, cet endroit risquait même d'un éventuel effondrement ou glissement de terrain.

Un exemple concret peut être illustré dans la figure 5.12. Oued Fekan, représenté en gras, digitalisé à partir des cartes topographiques, a été aménagé sur un tracé de plus de 25 km, son amont est les montagnes de Nesmoth, il coule vers la ville de Ghriss et il trouve son exutoire à l'ouest de la ville de Fekan, le réseau extrait à partir de SRTM (en bleu) montre le chemin emprunté par l'oued en période de crue.

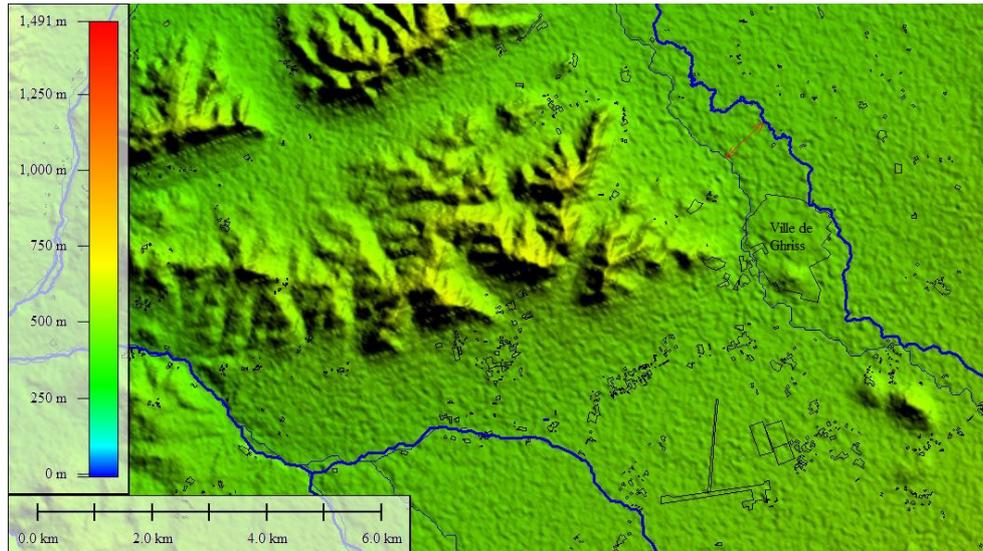


Figure 5.12. Délimitation des zones à risque d'inondation (montagne de Nesmoth)

On peut constater sur la figure reprise ci-dessus, que le tracé exact des cours d'eau ne peut être appréhendé valablement en utilisant comme seule source d'information la carte topographique. En effet, le léger changement en altimétrie dans les zones aplatées rend dans de nombreux cas impossible l'identification du tracé du réseau hydrographique. Il est même vraisemblable que le réseau coule une dizaine de mètres plus à l'ouest de la ville de Ghriss, cette zone à forte risque d'inondation a été identifiée par le réseau SRTM qui la traverse entièrement, ce résultat met en question la fiabilité du réseau hydrographique aménagé.

Un deuxième exemple est illustré dans la figure ci-dessous. Contrairement à ce qu'à été présenté sur la carte topographique (absence totale des cours d'eau au sud de la ville de Tighenif), le SRTM suggère l'existence d'un cours d'eau principal.

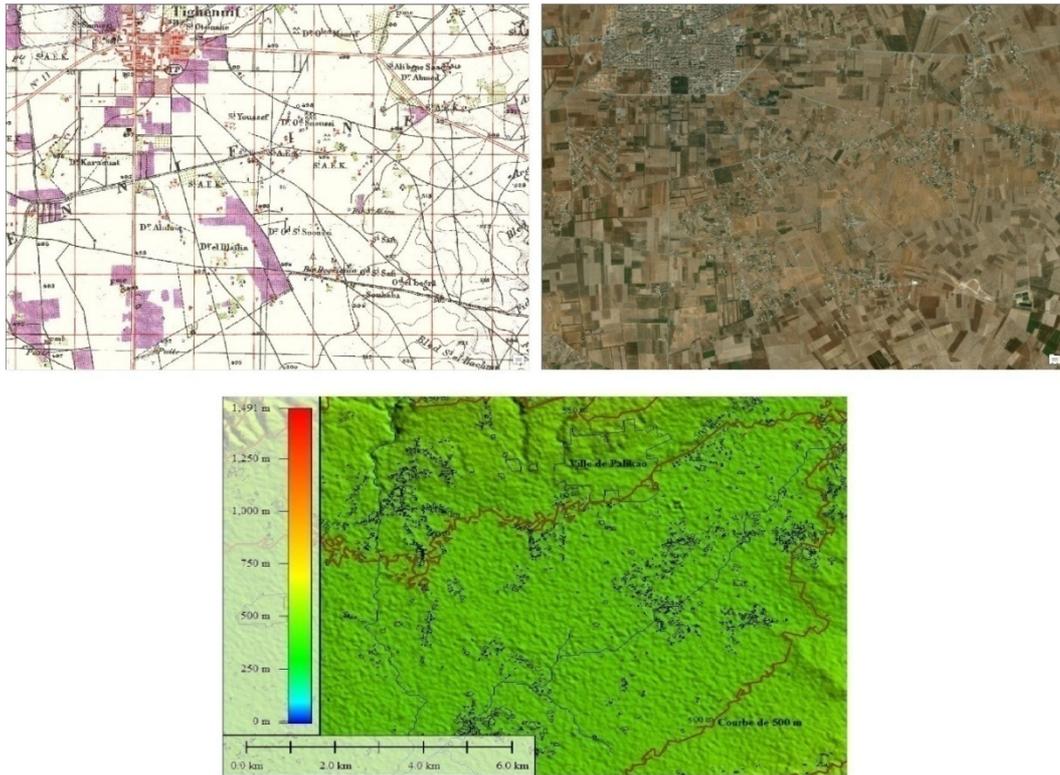


Figure 5.13. Délimitation des zones à risque d'inondation (Sud de Tighenif)

Une anomalie entre le réseau référentiel et celui de SRTM a été marquée au sud de la ville de Tighenif. En se basant sur la carte de 1/25000, et malgré qu'on voit bien qu'il y a une dépression très nette marquée par la courbe de 500 mètre d'altitude et qu'il y a le long de 25 Km² à l'amont, aucune trace de cours d'eau n'a été présentée sur la carte topographique. Contrairement, le réseau SRTM indique la présence d'un cours d'eau principal. On ne peut pas avoir un Oued en période de fortes eaux, forcément il y aura un écoulement le jour ou il pleuvra. Pour valider notre analyse, nous nous sommes déplacés sur terrain, effectivement on n'a pas trouvé des traces d'un oued, mais les habitants nous ont confirmés que les pluies violentes et torrentielles qui s'abattent dans cette zone durant des heures causent d'importants dégâts matériels, et qu'ils sont sous influence d'inondation.

5.4 Conclusion

Les notions d'aménagement du territoire, de règles d'urbanisme, de conduites architecturales, d'entretien des canaux de passage des eaux pluviales sont prises à la légère dans notre zone d'étude. Les nouvelles constructions qui s'érigent chaque jour sur des terrains inondables, exposent leurs propriétaires, dès la moindre crue, à l'invasion par les eaux pluviales. Pire encore, les élus municipaux en arrivent à autoriser et régulariser un grand nombre de ces constructions, en leur amenant de l'énergie électrique, des réseaux d'assainissement, et en les raccordant à l'eau potable et au gaz de ville, la construction des écoles et des dispensaires, à tel point qu'il n'est pas rare que des infrastructures et équipements publics de ce genre soient eux-mêmes implantés dans des zones

réglementairement non constructibles. Les politiques d'aménagement du territoire ont un impact sur les dégâts causés par les inondations.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques du bassin versant de l'Oued Fekan et son comportement hydrologique grâce à l'apport introduit par la télédétection, qui nous a offerte des données homogènes et permettait de développer des méthodes de traitement et de synthèses plus efficaces. Parmi ces données le modèle numérique de terrain qui donne l'information sur la topographie et le relief de terrain. Cette information a été utilisée pour l'extraction des indices géomorphologiques de notre zone d'étude. La méthode D8 avec schéma unidirectionnel a été adaptée, elle consiste à générer un plan de surface amont drainée dont on fixe un seuil pour extraire le réseau de drainage. L'extraction de plusieurs réseaux à différentes valeurs de seuil de surface amont drainée et les comparer à un réseau de référence nous a permis de définir une valeur de seuil optimal qui peut être utilisée pour étudier d'autres bassins similaires, et d'avoir les indices géomorphologiques du bassin versant et du réseau hydrographique. La valeur de ce seuil est inversement proportionnelle à la densité du réseau extrait. L'étude des facteurs météorologiques, hydro géomorphologiques et anthropiques ont permis de comprendre au mieux le comportement de l'hydro-système dans sa globalité. On a ensuite hiérarchisé les facteurs prédisposant, déclenchant, aggravant de crue et de ruissellement superficiel dans cette région. L'objectif était de reconstituer un réseau hydrographique de type statique réaliste, à partir d'un modèle numérique de terrain et des informations externes comme les cartes topographiques et la connaissance du terrain, cela permet d'ajuster le choix des méthodes d'extraction. Les résultats de l'ensemble des analyses réalisées ont servi à identifier le risque d'inondation.

Conclusion générale et perspectives

La gestion durable d'un bassin versant est complexe, elle nécessite de disposer de grands volumes de données en plus d'une connaissance cohérente des systèmes naturels et de leurs interactions avec les différentes composantes des socio-hydrosystèmes, particulièrement les relations entre les utilisations du sol et les principaux processus hydrologiques du cycle de l'eau. Ce travail de recherche sollicite une variété de données climatiques, météorologiques, hydrographiques et d'occupation du sol, et conduit à produire des informations pertinentes, à diverses échelles spatiales, sur les perturbations vraisemblables sur le climat local du bassin de la Macta et sur son réseau hydrographique, induites par les changements d'utilisation des sols. Nous analysons ici l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol et de ses impacts sur les terres agricoles, la température de surface et les eaux superficielles. Ces impacts sont évalués au travers de la production de cartes d'étalement urbain, de température de surface et de modélisation du réseau hydrographique en mettant en exergue l'intérêt de l'utilisation de la télédétection et des SIG.

Dans le contexte actuel d'une artificialisation exponentielle et quasi-généralisée des terres, l'évaluation et l'anticipation des impacts de l'étalement urbain présentent un intérêt tant pour les scientifiques que les gestionnaires du territoire, ce phénomène modifie l'occupation des sols, menace l'agriculture périurbaine, et entraîne des conséquences sur le plan environnemental. Son étude représente un enjeu primordial pour comprendre les effets de l'urbanisation sur les processus écologiques et naturels du bassin versant. Toutefois le suivi dans le temps, la mesure et la modélisation de l'étalement urbain posent encore de nombreux problèmes méthodologiques qui relèvent, en premier lieu, de la forte hétérogénéité et de la haute fréquence spatiale qui caractérisent les tissus urbain et périurbain. Aussi, la difficulté de disposer de séries de données spatialisées suffisamment précises sur des périodes de temps suffisamment longues pour retracer et caractériser la croissance urbaine à des fins prospectives.

Face aux limites en terme de précision spatiale, et à la non disponibilité des bases de données nationales qui permet de suivre et de quantifier l'étalement urbain, il est nécessaire d'avoir recours à la télédétection multi-sources. Toutefois, la diversité des résolutions spatiales, spectrales et temporelles des données d'une part, et les caractéristiques du milieu urbain d'autre part imposent une démarche de classification hybride et une approche multi-échelles, mêlant traitement automatique et photo-interprétation assistée par ordinateur. Dans ce travail, les démarches mises en œuvre ont privilégié l'application de méthodes de suivi déjà éprouvées et facilement reproductibles. Elles ont montré que l'étalement urbain qui touche des agglomérations de taille moyenne et exercés dans les plaines agricoles, entraîne des modifications importantes dans l'hydrologie, le sol et l'environnement du bassin versant.

L'extraction de la température de surface à partir des données de télédétection thermique, dans le cadre de l'évolution climatique locale et globale, est une nécessité pour le bassin versant de la Macta. Cette technique faiblement utilisée sur notre territoire d'étude, s'avère être un outil potentiellement intéressant pour estimer de manière régulière et à différentes échelles spatiales, la température des surfaces terrestres. Notre étude a démontré l'importance du changement thermique imposé par le changement dans l'utilisation du sol dans une région à vocation agricole. Les données OLI/TIRS de Landsat 8 ont été adaptées pour l'estimation fine de la température de surface et de l'émissivité en appliquant l'algorithme du canal unique. La validation avec des données in-situ couvrant la totalité de notre zone d'étude serait intéressante mais n'a pas été possible dans le cadre de ce travail en raison de l'absence de données à des dates, ou sous des conditions, voisines de celles de l'acquisition des images satellitaires. Ceci fait partie de nos préoccupations et perspectives futures.

L'analyse de la distribution spatiale de la Ts, NDVI et NDBI nous a permis d'identifier la relation entre le type d'occupation du sol et son impact sur la température de surface. Le diagramme de corrélation entre les trois variables durant les quatre saisons de l'année 2008, et la forte corrélation entre la Ts et le NDBI durant toutes les saisons suggère que les zones urbaines ont le plus grand impact sur la Ts. En comparant la corrélation entre le NDVI/NDBI et la Ts, la distribution spatiale de cette dernière peut être mieux expliquée par le NDBI que par le NDVI couramment utilisé. L'ensemble de résultats obtenus ont révélé des disparités thermiques flagrantes entre les différents modes d'occupation du sol.

Enfin, cette étude ouvre aussi de nouvelles perspectives basées sur l'exploitation de modèle numérique de terrain, et des informations externes comme les cartes topographiques et la connaissance du terrain pour l'aménagement des territoires et la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin hydrologique. La méthode D8 avec schéma unidirectionnel a été adaptée pour la reconstitution du réseau hydrographique de type statique réaliste, avec la possibilité de paramétrage du seuil de surface amont drainée. La comparaison de ce réseau avec le réseau référentiel, a rendu possible la détection des zones où l'aménagement sur terrain était insuffisant pour drainer le volume d'eau ruisselé, ce qui a permis de détecter les zones inondables. Les informations cartographiées sont destinées principalement aux décideurs et gestionnaires des ressources en eau et des territoires.

Les problèmes de décision à référence spatiale sont de nature multicritère et complexes. Le système d'information géographique et les données de la télédétection, s'avèrent les outils les plus adéquats pour appréhender ces problèmes. Les perspectives proposées s'orientent désormais vers une étape plus intégrée, nécessaire à ce stade des connaissances. Cette notion d'intégration est multiple, elle concerne non seulement la prise en compte de savoirs et de compétences complémentaires, mais aussi l'utilisation de méthodes d'analyse différentes ainsi qu'un dialogue constant avec les équipes de

terrain chargées de la gestion opérationnelle, dont le but est d'éviter, réduire ou compenser l'artificialisation des sols, et en particulier ses formes les plus impactantes et les moins réversibles.

Perspectives

Nous terminons cette conclusion en évoquant les différentes perspectives de recherche que nous envisageons d'aborder dans le futur.

(1) On vise une collaboration directe entre l'agence spatiale algérienne et notre laboratoire de recherche sur les systèmes biologiques et la géomatique pour mieux exploiter des données issues de nos satellites tels Alsat-2A et Alsat-2B pour répondre aux besoins et aux préoccupations des différents secteurs, notamment les changements d'utilisation et de couverture des sols, l'environnement et l'aménagement du territoire, la révision cartographique et le cadastre, les ressources naturelles, l'urbanisme et les infrastructures de base, et dans la gestion et la prévention des risques naturelles.

(2) L'une des principales tâches qui restera à achever est l'intégration de l'analyse multicritère (AMC) dans la cartographie des risques d'inondation qui prend ainsi en compte, en plus des critères de la pente, de l'altitude et de l'accumulation du débit, du type du sol et de sa rugosité, de l'occupation du sol et la proximité des constructions par rapport aux cours d'eau, un nombre plus grand d'aspects en lien avec l'environnement, la santé humaine, le social et l'économie.

(3) Le développement d'une solution de cartographie web, ou WebMapping nous permettra de publier sur internet, de manière dynamique et potentiellement interactive, des cartes issues de ses propres données, de ses traitements et de ses choix de symbologie. Les outils de cartographie peuvent également permettre de procéder à des traitements géomatiques en ligne. La dernière grande famille de solutions web "*Serveurs et clients cartographiques*" permet d'avoir davantage la main sur les différentes étapes du processus. Elle sépare le serveur du client, ce qui permet de pouvoir faire des requêtes attributaire ou de localisation sur les données directement stockées au niveau du serveur, et de l'autre côté, le client a la possibilité d'interagir avec ces données à distance avec un autre logiciel situé sur un autre ordinateur. Son architecture est flexible, il est possible de mettre directement en relation une base de données géographique avec les clients cartographiques en Javascript, ce qui facilite l'affichage cartographique par requête directement dans la base de données. Nous envisageons une solution web sera capable de suivre l'évolution spatio-temporelle des changements d'occupation du sol, en introduisant les informations nécessaires via le réseau internet.

Bibliographie

- Douville, H., Ribes, A., Decharme, B., Alkama, R., Sheffield, J., 2013. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nat. Clim. Change* 3, 59–62.
- Miralles, D.G., van den Berg, M.J., Gash, J.H., Parinussa, R.M., de Jeu, R.A., Beck, H.E., Holmes, T.R., Jiménez, C., Verhoest, N.E., Dorigo, W.A., others, 2014. El Niño–La Niña cycle and recent trends in continental evaporation. *Nat. Clim. Change* 4, 122–126.
- Zeng, Z., Wang, T., Zhou, F., Ciais, P., Mao, J., Shi, X., Piao, S., 2014. A worldwide analysis of spatiotemporal changes in water balance-based evapotranspiration from 1982 to 2009. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119, 1186–1202.
- VÖRÖSMARTY C.J., GREEN P. , SALISBURY J., LAMMERS R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477), p.284-288.
- QUENTIN GRAFTON R., KAREN HUSSEY (eds) (2011). *Water Resources Planning and Management*. Cambridge University Press, ISBN: 9780521762588, 800p.
- ABRAHAM J.-P. (1991). *L'Homme, l'eau et l'alimentation*. Nantes : ADEMART, ISBN 978- 2-909256-08-5, 46p.
- ANCTIL F. (2008). *L'eau et ses enjeux. Les presses de l'université Laval*, ISBN 978-2-8011- 5694-7, 248p.
- SIPES J.L. (2010). *Sustainable Solutions for Water Resources: Policies, Planning, Design, and Implementation*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, ISBN-10:0470529628, 368p.
- WESCOAT J. L., GIBERT F. W. (2003). *Water for life: water management and environmental policy*. Cambridge University Press, ISBN 0521369800, 342p.
- PEGRAM G., LI Y., QUESNE LE., SPEED R., LI J., SHEN F. (2013). *River basin planning: Principles, procedures and approaches for strategic basin planning*. Paris, UNESCO, ISBN 978-92-3-001152-9, 98p.
- LAURENT F. (1996). *Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux*. Thèse de Doctorant en Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives, 365p.
- LASSERRE F., BRUN A. (2007). *La gestion par bassin versant : un outil de résolution des conflits*. *Lex Electronica*, Vol.12, n°2 (Automne / Fall 2007). Disponible sur : http://www.lexelectronica.org/articles/v12-2/lasserre_brun.pdf
- BRUN A., LASSERRE F. (2012). *Gestion de l'eau : Approche territoriale et institutionnelle*. Presses de l'Université du Québec, Québec, ISBN-10: 2760533131, 210p.
- Chaouche, Keltoum, Luc Neppel, Claudine Dieulin, Nicolas Pujol, Bernard Ladouche, Eric Martin, Dallas Salas, and Yvan Caballero. (2010). *Analyses of Precipitation, Temperature and Evapotranspiration in a French Mediterranean Region in the Context of Climate*.
- Jentsch, Anke, Jürgen Kreyling, and Carl Beierkuhnlein. "A New Generation of Climate-Change Experiments: Events, Not Trends." *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, no. 7 (September 1, 2007): 365–74. doi:10.1890/1540-9295(2007)5[365:ANGOCE]2.0.CO;2.
- Zhang, Yongfang, Dexin Guan, Changjie Jin, Anzhi Wang, Jiabing Wu, and Fenghui Yuan. "Analysis of Impacts of Climate Variability and Human Activity on Streamflow for a River Basin in Northeast China." *Journal of Hydrology* 410, no. 3–4 (November 22, 2011): 239–47. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.09.023.
- Amara, A.O., and Yannick Pépin. *Analyse des données hydro-pluviométriques sur bassins versants en Algérie*. Mémoire de maîtrise. Montpellier: IRD, 2006. IRD Bondy. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010055143>.
- Hulme, Mike, Ruth Doherty, Todd Ngara, Mark New, and David Lister. "African Climate Change: 1900-2100." *Climate Research* 17, no. 2 (2001): 145–68.
- Arrus, René, and Nathalie Rousset. "L'agriculture Du Maghreb Au Défi Du Changement Climatique : Quelles Stratégies D'adaptation Face À La Raréfaction Des Ressources Hydriques ?," February 28, 2007. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00134115>.
- Khalidi, Abdelkader. "Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires del'Ouest Algérien ' Monts de Tlemcen -Saida.'" Doctorat d'état, UNIVERSITE D'ESSENIA, 2005. <http://hydrologie.org/THE/KHALDI.pdf>.
- Laborde, J. P. "Les Différentes Étapes D'une Cartographie Automatique: Exemple de La Carte Pluviométrique de l'Algérie Du Nord." *Public. de l'AIC8* (1995): 37–46.

- Meddi, Mohamed, Amel Talia, and Claude Martin. "Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie)." *Physio-Géo. Géographie, physique, et environnement*, no. Volume 3 (January 1, 2009): 61–84. doi:10.4000/physio-geo.686.
- Meddi, Mohamed M., Ali Arkamose Assani, and Hind Meddi. "Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria." *Water Resources Management* 24, no. 14 (2010): 3817–33.
- Meddi, M., A. Boucefiane, R. Taylor, C. Tindimugaya, M. Owor, and M. Shamsudduha. "Impact of Climate Change on Groundwater Recharge in the Chélif-Zahrez Basin of Algeria." In *Groundwater and Climate in Africa. Proceedings of the Kampala Conference, Uganda, 24-28 June 2008.*, 135–42, 2009. <http://www.cabdirect.org/abstracts/20103142519.html>.
- WANI S.P., SREEDEVI T.K., REDDY T.S.V., VENKATESWARLU B., PRASAD C.S. (2008). Community watersheds for improved livelihoods through consortium approach in drought prone rain-fed areas. *Journal of Hydrological Research and Development*, 23: p.55-77.
- AMOROS C., PETTS G.E. (1993). *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson, Col. Ecologie, 300p.
- LASSERRE F., BRUN A. (2007). *La gestion par bassin versant : un outil de résolution des conflits*. *Lex Electronica*, Vol.12, n°2 (Automne / Fall 2007). Disponible sur : http://www.lexelectronica.org/articles/v12-2/lasserre_brun.pdf
- Mostert, E. (2006). « Integrated Water Resources Management in the Netherlands : How Concepts Function », *Journal of Contemporary Water Research and Education*, no 135, p. 19-27.
- AUGER P., BAUDRAND J. (2004). *Gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec : cadre de références pour les organismes des bassins versants prioritaires, environnement Québec*. Ministère de l'Environnement, Québec.
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) (2003): *Improving water management: recent OECD experience*. OECD, Paris, 119p. Disponible sur : http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oeed/environment/improvingwater-management_9789264099500-en#page4
- BRÜSCHWEILER S. (2003). *Gestion Intégrée des Ressources en Eau - La voie du développement durable*. Info Resources Focus, Vol.1, 16p.
- GHIOTTI S. (2007). *Les territoires de l'eau. Gestion et développement en France*. CNRS Editions, Paris, Espaces et Milieux, 246p.
- UNESCO (2009). *IWRM Guidelines at River Basin Level*. International Hydrological Programme of UNESCO, 320p.
- BURTON J. (2003), *Integrated Water Resources Management on a Basin Level. A training manual*. MultiMondes ed. International Hydrological Programme of UNESCO, 240p.
- LE GOULVEN P., BOUARFA S., KUPER M. (2005). *Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant [CD-ROM]*. Montpellier (France) : CIRAD. n.p. 3. Séminaire du PCSI (Recherche Coordonnées sur les Systèmes Irrigués), 2003/12/2-3, Montpellier (France).
- SGHAIER M., MAHDHI N., FETOUI M., NIHAYA O. (2006). *La gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle de bassin versant en zones arides : proposition méthodologique et applications*. *New Medit*, Vol. 5, n. 4, p.23-31.
- AGENDA 21 POUR L'EAU (2011). *Gestion par bassin versant – Idées directrices pour une gestion intégrée des eaux en Suisse*. Berne, Paul Haupt, 20p.
- DELDEN H. V., SEPPELT R., WHITE R., JAKEMAN A.J. (2011). *A methodology for the design and development of integrated models for policy support*. *Environmental Modelling & Software*, 26 (2011), p.266-279.
- Reynard Emmanuel, 2000, *Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne, Les cas de Crans-Montana-Aminona et Nendaz*, Thèse doctorat ès lettres, Université de Lausanne, Institut de Géographie, 504 p.
- SCOULLOS M., MALOTIDI V., SPIROU S., CONSTANTIANOS V. (2002). *Integrated Water Resources Management in the Mediterranean*. GWP-Med & MIO-ECSDE, Athens, 2002.
- Philip, R., Anton, B., Bonjean, M., Bromley, J., Cox, D., Smits, S., Sullivan, C. A., Van Niekerk, K., Chonguiça, E., Monggae, F., Nyagwambo, L., Pule, R., & Berraondo López, M., (2008b). *Gouvernement local et Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE): Partie III : S'engager en faveur de la GIRE*, ICLEI Local Governments for Sustainability, Africa Secretariat, Cape Town, South Africa.

- Dahmani, B., & Bithorel, C., (2000). Déminéralisation des eaux saumâtres de Brédéah dans la région du bassin hydrographique Oranie–Chott–Chergui Partie I: Hydrogéologie de la nappe de Brédéah. *Desalination*, 137 (1-3): 297–309.
- Remini, B., (2010). La problématique de l'eau en Algérie du Nord. *Larhyss/Journal*, N 08, Juin 2010, pp. 27-46
- Petrella, R. (1998). *Le manifeste de l'eau. Pour un contrat mondial*. Éditions Labor, Bruxelles, Belgique.
- GANGBAZO G., 2004, *Gestion intégrée par bassin versant : concepts et application*. Environnement Québec, Ministère de l'Environnement, 58 p.
- Kerr, J. T. and M. Ostrovsky (2003). "From space to species: ecological applications for remote sensing." *Trends in Ecology & Evolution* 18(6): 299-305.
- Betbeder, Julie., 2015. *Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques*.
- Guillaume Sainteny sur *Responsabilité & Environnement* N° 49 Janvier 2008.
- Peiser R., 2001. *Decomposing urban sprawl*. *Town planning review* 76, 3: 275-298.
- Squires G.D., 2002. *Urban sprawl: Causes, Consequences and Policy Responses*. The urban institute press, Washington DC.
- Wiel M., 2006a. *La polysémie de la densité... Comment vivre avec... Communication au colloque organisé à Créteil par l'association urbaplus sous le titre : « La densité peut elle enrayer l'étalement urbain ? », Brest, le 25 décembre 2006.*
- Kerr, J. T. and M. Ostrovsky (2003). "From space to species: ecological applications for remote sensing." *Trends in Ecology & Evolution* 18(6): 299-305.
- EEA (European Environment Agency), 2006. *Urban sprawl in Europe. The ignored challenge*. 56 pp., http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_10.
- Torrens P.M., 2008. *A Toolkit for Measuring Sprawl*. *Appl. Spatial Analysis*, 1, pp. 5-36.
- M. guerois, F. Paulus, avril 2002. *Commune centre, agglomération, aire urbaine : quelle pertinence pour l'étude des villes ? CYBERGEO*, No.212, 26.
- M. Meddi, A.Talia, C.Martin, 2009. *Evolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie)*. *Physio-Géo*. DOI: 10.4000/physio-geo.686
- Moise Tsayem Demaze, 2010. *Un panorama de la télédétection de l'étalement urbain*. *ESO Travaux et Documents, Espaces et Sociétés - UMR 6590*, 2010, pp.99-124. <halshs-00508974>
- Benz U.C., P. Hofmann, G. Willhauck, I. Lingenfelder and M. Hetnen, 2004. *Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58:239-258.
- Girard M.-C. et Girard C. M. - 2010 - *Traitement des données de télédétection*. Ed. Dunod, 529p.
- Blaschke T., and Strobl J., 2001. *What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS*. *GISZeitschrift für Geoinformationssysteme*, 6, pp. 12-17.
- Lhomme S., Puissant A., Weber C., He D.C. et Morin D., 2004. *Evaluation de la qualité de segmentations appliquées à une image Ikonos pour l'identification du bâti en milieu urbain*. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, N173/174.
- Christophe REVILLION, 2012. *Système d'information environnementale sur les Caraïbes : Du satellite aux décideurs. Méthodologie pour la classification orientée-objet de l'occupation du sol des petites Antilles Rapport d'activité (Septembre 2011 à juin 2012)*.
- Thi-Thanh-Hiên Pham, Dong-Chen He. *Classification orientée objet d'une image Quickbird de la ville de hanoi (viêtname) : étude empirique des paramètres de segmentation*. *Teledetection, Editions des Archives Contemporaines*, 2013, 11 (2), pp.287-305. <<http://www.archivescontemporaines.com/revues/35>>. <halshs-01134611>

- Lambin, E.F. And Ehrlich, D. 1996. The surface temperature - vegetation index space for land cover and land cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing* 17, 463-487.
- Watts, P.D., Allen, M.R., Nightingale, J. 1996. Wind speed effects on sea surface emission and reflection for the Along Track Scanning Radiometer. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology* 13: 126-141.
- Liu, L., Zhang, Y., 2011. Urban Heat Island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: a case study in Hong Kong. *Remote Sens.* 3:1535–1552. <http://dx.doi.org/10.3390/rs3071535>.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sens. Environ.* 90 (4): 434–440.
- Abdellaoui, A. 1985b. The fundamental problems for the energy balance study by satellite imagery. Proc.ISLSCP Conference, Roma (Italy).
- Aicha Benmecheta. Estimation de la température de surface a partir de l'imagerie satellitale; validation sur une zone côtière d'Algérie. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2016 Français. <NNT : 2016PESC1171>. <tel-01565894>
- Becker, F. and Li, Z.L. 1995. Surface temperature and emissivity at various scales : definition, measurement and related problems, *Remote Sensing Review*, Vol. 12, pp. 255-253.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sens. Environ.* 90 (4): 434–440.
- Juan C. Jiménez-Muñoz, José A. Sobrino, Dražen Skoković, Cristian Mattar, and Jordi Cristóbal. 2014. Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *Geoscience and Remote Sensing Letters*. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2312032
- Hook, S.J., Gabell, A.R., Green, A.A., Kealy, S. 1992. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. *Res. Environ.* 42:123–135.
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., and Zhao, S. 2015. "An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, vol. 7, no. 4, pp. 4268–4289.
- Irons, J.R., Dwyer, J. L., and Barsi, J. A. 2012. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sens. Environ.*, vol. 122, pp. 11–21.
- McMillin, L.M. 1971. A method of determining surface temperatures from measurements of spectral radiance at two wavelengths. Ph.D. dissertation, Iowa State University. (Available from University Microfilms International, P. O. Box 1764, Ann-Arbor, MI 48.
- Juan C. Jimenez-Munoz, Cristobal J, José A. Sobrino, Soria G, Ninyerola M & Pons X. 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from LANDSAT thermal-infrared data. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(1):339-349.
- C. Kergomard. 2000. Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Zha, Y. & Gao, J. & Ni, S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *Int. J. Remote Sens.* 24 (3):583–594.
- Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7:769–779, [http://dx.DOI.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6).
- Jackson, R.D., Reginato, R.J. And Idso, S.B. 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651-656.
- Goward, S.N., Xue, Y. And Czajkowski, K.P. 2002. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature / vegetation index measurements: an exploration with the simplified simple biosphere model. *Remote Sensing of Environment*, n°79, 225-242.
- Dousset B. et Gourmelon F., 2003, « Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58 Iss.1-2 : pp. 43 à 54.

- Benoit Coudert. Apport des mesures de température de surface par télédétection infrarouge thermique pour la modélisation des échanges d'énergie et d'eau à l'interface sol végétation atmosphère. Autre. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2006. Français. <tel-00151869>
- Ysabelle Filiatreault, Changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation. université de sherbrooke, 2015. <http://hdl.handle.net/11143/6942>
- Noômène Fehri, « L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 8 | 2014, mis en ligne le 21 March 2014, Consulté le 25 March 2014. URL : <http://physiogeo.revues.org/3953> ; DOI : 10.4000/physio-geo.3953
- Chocat Bernard. Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque d'inondation : l'exemple de l'Yseron à Lyon . In: *Revue de géographie de Lyon*, vol. 72, n°4, 1997. Le climat urbain. pp. 273-280;
- Wilson E.H., Hurd J.D., Civco D.L., Prisloe M.P. and Arnold C., 2003. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sensing of Environment*, Volume 86, Issue 3, pp. 275–285.
- Allain R., 2004. Morphologie urbaine, géographie, aménagement et architecture de la ville. Armand Colin, Paris, 254 p.
- Rahim Aguejdad. Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole.. *Géographie*. Université Rennes 2, 2009. Français. (tel-00553665)
- Antoni J.-P., 2003. Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain Aspects conceptuels et gestionnaires Application à Belfort. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur.
- Guerois M. et Paulus F., 2002. Commune centre, agglomération, aire urbaine : quelle pertinence pour l'étude des villes. *Cybergeo*, n°212.
- Mohamed Meddi, Amel Talia, Claude Martin. Evolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, AERES, 2009, III, pp.61-84. (hal-00395316)
- Hubert-Moy L., Aguejdad R., Vannier C., Lalau-Keraly A. et Hervieux J.M. 2008. L'artificialisation des terres va se poursuivre. *Presses Universitaires de Rennes - Bretagne[s] - N° 10 Bretagne 2030*.
- Bhaskaran, S., Paramananda, S., Ramnarayan, M., 2010, Per-pixel and object-oriented classification methods for mapping urban features using Ikonos satellite data, *Applied Geography* 30:650-665.
- Yuan, F., Bauer, M. E., 2003, Mapping impervious surface area using high resolution imagery: a comparison of object-based and per pixel classification, *ASPRS Annual Conference*, Reno, Nevada, pp. 8.
- Yu, Q., Gong, P., Clinton, N., Biging, G., Kelly, M., Schirokauer, D., 2006, Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(7):799-811.
- Dey, V., Zhang, Y., Zhong, M., 2010, A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective, *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS* (Wagner W., Székely, B., eds.), Vienne, pp. 31-42.
- Carlson TN & Ripley DA (1997) On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62(3):241-252.
- Nehal, L.&Hamimed, A.&Khaldi, A.&Souidi, Z.&Zaagane, M.(2017).Evapotranspiration and Surface Energy Fluxes Estimation Using the Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus Image over a Semiarid Agrosystem in the North-West of Algeria. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 4, 691-702. DOI:<http://dx.Doi.org/10.1590/0102-7786324016>
- Arnaud-Fassetta G., Astrade L., Bardou E., Corbonnois J., Delahaye D., Fort M., Gautier E., Jacob N., Peiry J.-L., Piégay H., Penven M.-J., 2009. Fluvial geomorphology and flood-risk management. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, 109-128.
- Scarwell H.-J., Laganier R., 2004. Risque d'inondation et aménagement durable des territoires. *Science sociales*, p 288.
- Harding, Timothy. Romerio-Giudici, Franco. Rossiaud, Jean. Wagner, Jean-Jacques. Bertrand, Sebastien. Frischknecht, Corine. Laporte, Jean-Dominique. Management des risques majeurs : des disciplines à l'interdisciplinarité. 2001 <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:24381>
- Jenson, S.K., Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data from geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 54, p. 1593-1600.

- Planchon, O., and Darboux, F. 2002. "A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models." *Catena* 46(2): 159–176.
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, pp 323-344.
- Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier. 1990. Seuillage du réseau hydrographique à partir de Modèle Numérique de Terrain en fonction du critère de surface drainée.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L. et Rodriguez-Iturbe, I. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5.
- Hostache, R., Puech, C., Raclot, D., 2005. Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography, Sélection des meilleurs articles de SAGEO* (article 381).
- Jean-Baptiste Henry. 2004. Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. *Géographie. Université Louis Pasteur - Strasbourg I. Français*. <tel-00009093>
- Peucker T.K., Fowler R.J., Little J.J. & Mark D.M., 1978. The triangulated irregular network. In: *Proceedings of the Digital Terrain Models Symposium, 9-11 May 1978, St. Louis, Missouri*. Bethesda, MD, USA: American Society of Photogrammetry/American Congress on Surveying and Mapping, 516-540.
- Laurini, R. & Milleret-Raffort, F., 1993. *Les bases de données en géomatique*, éd. Hermès, Paris, 340 p.
- Fairfield J, et Leymarie P. (1991). Drainage networks from grid Digital Elevation Models. *Water resources Research*. pp 709-717.
- Jenson S.K, et Domingue J.O. (1998). Extracting topographic structures from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, pp 1593-1600.
- Villeneuve, J. P., Hubert, P., Mailhot, A. & Rousseau, A. N. (1998). La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue des sciences de l'eau*, 11, 19–39. <https://doi.org/10.7202/705327ar>
- Biswas S., Sudhakar S. et Desai V. R., 1999. Prioritization of sub watersheds based on morphometric analysis of drainage basin. *A European Scientific Journal* October 2016 edition vol.12, No.29 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431287. Remote sensing and GIS approach. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155-166.
- Yang Hong, Yu Zhang, Sadiq Lbraham Khan (Eds.) *Hydrologic Remote Sensing: Capacity Building for Sustainability and Resilience*, Francis and Taylor Group, pp.73-102, 2016, 978-1-4987-2666-5.
- Gineste P., 1998. Contribution de l'imagerie satellitale Radar ERSI à la détection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant agricole par TOPMODEL. Thèse, ENGREF, 224 p
- C. Loumagne, M. Normand. Apport de la télédétection à la modélisation hydrologique. *Ingénieries - E A T, IRSTEA* édition 1997, p. 15 - p. 24. <hal-00464048>
- C. Puech, Jean-Stéphane Bailly. Cheminement des eaux superficielles et télédétection pour la modélisation hydrologique distribuée. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 2010, p. 39 - p. 44. [ff10.1051/lhb/2010032ff](https://doi.org/10.1051/lhb/2010032ff). [ffhal-00561044f](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00561044f)
- M. Tanguy. *Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise*, 2012.
- Lambert R., Prunet C., 2000. L'approche géographique de l'inondation. L'exemple de la Garonne à l'aval de Toulouse. In : *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie*, sous la direction de J.P. BRAVARD, Édit. SEDES, Paris, p. 39-53.
- Chocat, B., 1997. *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement*. EURYDICE 92, 1124 p.
- Desbordes M., 1989. Modélisation en hydrologie urbaine. *Recherches et Applications*. Université Montpellier II-Laboratoire de l'Hydrologie amthématique-STU, 183p.
- Desbordes M., 1995. Etude de faisabilité d'un modèle simplifié de simulation d'inondation pluviale urbaine. *Euroflood 2. The management of consequence of climatic change UMII*, 20 p.
- Lang M, Townsend P & Kasischke E (2008) Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment* 112(10):3898-3907.

- Townsend PA & Walsh SJ (1998) Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology* 21(3-4):295-312.
- Neal J, Fewtrell TJ, Bates P & Wright NG (2010) A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. *Environmental Modelling & Software* 25:398-411.
- Haider S, Paquier A, Morel R & Champagne JY (2003) Urban flood modelling using computational fluid dynamics. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water and Maritime Engineering* 156(2):129-135.
- Mason DC, Speck R, Devereux B, Schumann GJP, Neal JC & Bates PD (2010) Flood Detection in Urban Areas Using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(2):882-894.
- Mallinis G, Gitas IZ, Giannakopoulos V, Maris F & Tsakiri-Strati M (2011) An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *International Journal of Digital Earth* 6(Sup2):1-13.
- Puech C & Raclot D (2002) Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods. *Hydrol. Process.* 16(8):1593-1602.
- Brivio PA, Colombo R, Maggi M & Tomasoni R (2002) Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. *International Journal of Remote Sensing* 23(3):429-441.
- Van der Sande CJ, De Jong SM & De Roo APJ (2003) A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4(3):217-229.
- Dubayah R.O., Wood E.F., Engman E.T., Czajkowski K.P., Zion M., Rhoads J., 2000, Remote sensing in hydrological modeling, in : Remote sensing in hydrology and water management, Schultz G.A. and Engman E.T. Eds, Springer Verlag, Berlin, 85-102.
- Droogers P., Kite G., 2002, Remotely sensed data used for modelling at different hydrological scales, *Hydrological Processes*, Vol. 16 (8), 1543-1556.
- Jean Pierre Lamagat, Jean Claude Bader. Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs. Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur la Gestion Intégrée de l'Eau au Sein d'un Bassin Versant, 2003, Montpellier, France. 14 p. cirad-00178260
- Laurini, R. & Milleret-Raffort, F., 1993. Les bases de données en géomatique, éd. Hermès, Paris, 340 p.
- Peucker, T.K. & Douglas, D.H., 1975. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 4, pp 375-387.
- Julie Charleux-Demargne. 2001. Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants. Cemagref-Engref, Montpellier, France. 26-58 p.
- Depraetere, C. & Moniod, F., 1991. Contribution des modèles numériques de terrain à la simulation des écoulements dans un réseau hydrographique. *Hydrologie Continentale*, 6(1), pp29-53.
- Gineste P., 1998. Contribution de l'imagerie satellitale Radar ERSI à la détection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant agricole par TOPMODEL. Thèse, ENGREF, 224 p.
- Cudennec, C, 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique. Thèse de l'ENSAR, 198 p.
- Tarik Ghodbani et Khélifa Amokrane, « La zone humide de la Macta : un espace à protéger sur le littoral ouest de l'Algérie », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 7 | 2013, mis en ligne le 02 mars 2013, consulté le 22 juin 2020. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/3228> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3228>
- SEMMOUD B. (1986), Industrialisation et espace régional en Algérie, le cas de l'Oranie littorale, tomes 1 et 2, Alger, OPU, 703 p.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et (MATE) (1995), L'aménagement du territoire dans sa dimension régionale, 123p.

- Cuq F., 2000. Systèmes d'information géographique et gestion intégrée des zones côtières. In Populus & Loubersac : Coastgis'99 : Geomatics and coastal environment, Ifremer/SHOM : 18-29.
- Aspinall R.J., 1995. GIS : their use for environmental management and nature conservation. *Parks*, 5(1) : 20-31.
- Denègre J., 1992. Nouvelles technologies au service de l'investigation géographique : le rôle de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique. *Revue SIGAS*, 2(2) : 139-149.
- Bergeron M., 1993. Vocabulaire de la géomatique. Cahiers de l'Office de la langue française. Les Publications du Québec.
- Denègre J., 1992. Nouvelles technologies au service de l'investigation géographique : le rôle de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique. *Revue SIGAS*, 2(2) : 139-149.
- Tomlinson R. & Petchenik B.B., 1988. Reflections on the revolution : the transition from analogue to digital representations of space, 1958-1988. *The American cartographer*, 15(3) : 243-334.
- Rhind D.W., 1987. Recent developments in geographic information systems in the UK. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(3) : 229-24.
- Coppock J.T. & Rhind D.W., 1991. The history of GIS. In Maguire et al. : *Geographical Information Systems*, Longman Scientific & Technical : 21-43.
- Carter J.R., 1989. On defining the geographic information system. In *Ripple : Fundamentals of Geographic Information Systems : a compendium*, ASPRS/ACSM : 3-7.
- Pornon H., 1992. Systèmes d'information géographique pour petites communes. STU.
- Denègre J. & Salgé J.F. 1996. Les systèmes d'information géographique. PUF.
- Goodchild M., 1992. Geographical information science. *International Journal of Information Systems*, 6(1) : 31-45.
- Bergeron M., 1993. Vocabulaire de la géomatique. Cahiers de l'Office de la langue française. Les Publications du Québec.
- Bédard Y., 1987. Sur les différents types de système d'information à référence spatiale. In actes du congrès conjoint de Carto-Québec et de l'Association canadienne de cartographie, Québec (Canada) : 73-87.
- Gayte O., Libourel T., Cheylan J.P., Lardon S., 1997. Conception des systèmes d'information sur l'environnement. Hermès.
- Le Berre I., 1999. Mise au point de méthodes d'analyse et de représentation des interactions complexes en milieu littoral. Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale.
- De Sède M.H. & Thiéroul M., 1996. La représentation systémique du territoire : un concept structurant pour les SIRS institutionnels. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(1/1996) : 27-50.
- Cheylan J.P., Mielliet P., Waniez P., 1993. Les systèmes d'information géographique : un état de l'art. *Mappemonde*, 4/1993 : 2.
- Prélaç-Droux R., 1995. Système d'information et gestion du territoire. Approche systémique et procédure de réalisation. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gourmelon F., 2002. Classification automatique d'ortho-photographies numérisées pour une cartographie à grande échelle de la végétation terrestre. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28/2 : 168-174.
- D'Oleire-Oltmanns W. 1997. Dans l'actes des rencontres internationales : La cartographie pour la gestion des espaces naturels, St Etienne : 289-290.
- Lardon S., Maurel P., Piveteau V., 2001. Représentations spatiales et développement territorial. Hermès.
- Gourmelon F. & Le Berre I., 2001. De l'application scientifique au SIG institutionnel : le cas du SIGIroise. In actes du symposium international Coastgis'01 (Halifax, 2001).
- M. Robin., 1995. Des satellites aux systèmes d'information géographiques. La télédétection. Université Nathan, 18, 29, 30, 42.
- BARSI, J.A.; BARKER, J.L.; SCHOTT, J.R., 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. *J. Proc. IEEE. Int. v. 5*, p. 3014-3016.

Canada Centre for Remote Sensing/Natural Resources Canada., 1997. GlobeSAR2 Radar Image Processing and Information Extraction Workbook Version 1.2.Ottawa, Ontario, Canada.

Centre Canadien de Télédétection., 2019 Notions fondamentales de télédétection.
<https://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/imagerie-satellitaire-photos-aer/tutoriel-notions-fondamentales-teledection/9310>