



Département d'hydraulique  
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau  
IRRIGATION PROJECT  
Bureau d'études Nationale Eau et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

Essai méthodologique de monitoring des  
zones agricoles irriguées par la station  
d'épuration de Boumerdès

Hassiba SEGHIR

Sous la direction de Benziada Salim Maître assistant

Présenté et soutenu publiquement le 29 Juin 2019

**Composition de jury :**

Présidente	Mme.Benmamar	Professeur	ENP
Rapporteur	M.S.Benziada	MAA	ENP
Examineurs	M.S.Tachi	MA	ENP
	M.H.Bouzeria	MA	U.Blida
	M.A.Boukhari	Ingénieur	SEAAL





Département d'hydraulique  
Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau  
IRRIGATION PROJECT  
Bureau d'études Nationale Eau et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

Essai méthodologique de monitoring des  
zones agricoles irriguées par la station  
d'épuration de Boumerdès

Hassiba SEGHIR

Sous la direction de Benziada Salim Maître assistant

Présenté et soutenu publiquement le 29 Juin 2019

**Composition de jury :**

Présidente	Mme.Benmamar	Professeur	ENP
Rapporteur	M.S.Benziada	MAA	ENP
Examineurs	M.S.Tachi	MA	ENP
	M.H.Bouzeria	MA	U.Blida
	M.A.Boukhari	Ingénieur	SEAAL

## ملخص

جرت تجربة منهجية لرصد المناطق الزراعية المروية بالمياه المعالجة من محطة التنقية في بومرداس وهذا من خلال دعم استخدام الوسائل المبتكرة ولكن أيضاً توحيد الأدوات في الزمان والمكان، وأيضاً تطوير حلول لمعالجة صور الأقمار الصناعية. وهذه الأخيرة تمت من خلال الاستعانة بأدوات رسم الخرائط الرقمية التي تسمح بمراقبة الغطاء النباتي ومؤشر التربة بالإضافة إلى تقنية الاستشعار المتصلة التي هي سهلة الاستخدام و أصبحت أداة قياس في الوقت الفعلي للخصائص في الموقع وتنفيذ بطاقة التوصية.

**الكلمات المفتاحية :** الرصد ، مؤشرات الغطاء النباتي ، نظم المعلومات الجغرافية ، الري ، المياه المعالجة.

## Abstract:

A methodological trial to monitor irrigated agricultural areas in treated water from the Boumerdès purification plant was attempted. And this by taking support on the use of innovative means but also unifying tools in time and space, and also the development of solutions combining the processing of satellite photos. And whose processing has been carried out by interfacing with digital mapping tools generating vegetation and soil index monitoring as well as connected sensor technology which is easy to use and becomes a real-time measurement tool of in situ parameters and implementation of a recommendation card.

**Key words:** Monitoring, vegetation indices, GIS, irrigation, treated water.

## Résumé :

Un essai méthodologique de monitoring de zones agricoles irriguées en eaux épurées issues de la station d'épuration de Boumerdès a été tenté. Et cela en prenant appuis sur l'usage de moyens innovants mais aussi d'outils fédérateurs dans le temps et dans l'espace, et aussi le développement de portabilité de solutions alliant le traitement de photos satellitaires devenus accessibles. Et dont le traitement a été effectué moyennant un interfaçage à des outils de cartographie numérique générant le suivi d'indices de végétation et de sol ainsi que de la technologie des capteurs connectés dont l'usage est aisé et devient un moyen de mesure en temps réel de paramètres in situ et de mise en œuvre d'une carte de préconisation.

**Mots clés :** Monitoring, indices de végétation, SIG, irrigation, eaux épurées.

## **Remerciements**

*Je remercie Allah de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce modeste travail. Je remercie mes parents de m'avoir élevé, instruit, pour leurs sacrifices, pour leur amour, pour leur patience,.... Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne saurait suffire pour leur exprimer ma reconnaissance et mes remerciements.*

*Je tiens à remercier mon encadreur Mr. Benziada Salim pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je désire aussi remercier le professeur Benmamar Saïda qui m'a fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires et pour son soutien moral.*

*Je tiens à remercier également monsieur Bendada et madame Mekhlouf, responsables dans le bureau d'études NEE , qui m'ont fourni les données nécessaires pour mon projet de fin d'étude.*

*Enfin, je remercie mes frères, ma sœur et ma chère amie Wafa pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements qui ont été d'une grande aide ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de mon projet de fin d'étude.*

# Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des sigles

Introduction générale .....	12
1 Réutilisation des eaux usées épurées :.....	15
1.1 Introduction : .....	15
1.2 Irrigation au moyen d'eaux usées épurées : .....	15
1.2.1 Les avantages et les risques : .....	15
1.2.2 Paramètres physico-chimiques prises en compte :.....	16
1.3 Valorisation des boues :.....	17
1.3.1 Risques de contamination :.....	17
1.4 Conclusion :.....	18
2 Le monitoring en agriculture :.....	20
2.1 Définition du monitoring en agriculture :.....	20
2.2 Paramètres à contrôler dans l'agriculture :.....	20
2.2.1 L'indice de surface foliaire :.....	20
2.2.2 L'eau : .....	21
2.2.3 La chlorophylle :.....	22
2.2.4 Les éléments nutritifs :.....	22
2.2.5 L'argile :.....	25
2.2.6 Matières organiques : .....	27
2.3 Conclusion :.....	28
3 Télédétection agricole :.....	30
3.1 Introduction :.....	30
3.2 Le recueil d'informations :.....	30
3.3 L'importance de la télédétection :.....	31
3.4 Le prétraitement des images satellitaires :.....	32
3.4.1 Les étapes de la correction des images satellitaires:.....	32
3.5 QGIS :.....	33
3.5.1 Description :.....	33
3.5.2 Fonctionnalités : .....	34
3.6 Classification semi-automatique en utilisant QGIS:.....	34
3.6.1 SCP menu :.....	34
3.6.2 Prétraitement : .....	35
3.7 Conclusion :.....	39

4	Les indices de végétation :.....	41
4.1	Introduction :.....	41
4.2	Définition de l'indice de végétation :.....	41
4.3	Le choix des bandes des indices de végétation :.....	41
4.4	Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge.....	42
4.5	Les principaux indices de végétation :.....	43
4.5.1	Les indices simples :.....	43
4.5.2	Les indices prenant en compte la température de surface : .....	46
4.5.3	Les indices prenant en compte l'influence des sols : .....	47
4.5.4	Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère :.....	52
4.5.5	Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère : .....	54
4.5.6	Les indices hydriques : .....	55
4.5.7	Indices de paysage : .....	56
4.5.8	Indices géologiques :.....	56
4.6	Choix d'un indice :.....	57
4.7	Limitations des indices de la végétation :.....	58
4.8	Conclusion :.....	59
5	Le monitoring de la zone agricole de Boumerdès : .....	61
5.1	Introduction :.....	61
5.2	Présentation de la zone d'étude :.....	61
5.2.1	Délimitation spatiale : .....	61
5.2.2	Localisation géographique : .....	61
5.2.3	Présentation de la STEP :.....	63
5.3	Acquisition et correction des images satellitaires :.....	69
5.3.1	L'acquisition de l'image satellitaire :.....	69
5.3.2	La correction des images satellitaires :.....	71
5.4	Calcul des indices de végétation :.....	74
5.4.1	SIG :.....	74
5.4.2	ArcGIS Pro :.....	74
5.5	Résultats obtenus avec interprétation :.....	79
5.5.1	NDVI : .....	79
5.5.2	Green NDVI :.....	79
5.5.3	Red-Edge NDVI : .....	80
5.5.4	VARI : .....	81
5.5.5	SR : .....	82
5.5.6	Red-Edge SR : .....	83

5.5.7	MTVI2 :	84
5.5.8	RTVICore :	85
5.5.9	CI Rededge et CI Green :	86
5.5.10	MNDWI :	87
5.5.11	NDMI :	88
5.5.12	Iron oxide :	89
5.5.13	Ferrous Minerals :	90
5.5.14	Clay minerals :	91
5.5.15	NDBI :	92
5.5.16	NBR :	93
5.5.17	BAI :	94
5.5.18	Indice de forme :	95
5.6	Conclusion :	97
6	Solutions proposées :	99
6.1	Introduction :	99
6.2	Les problèmes et les solutions :	99
6.2.1	Manque d'azote :	99
6.2.2	Manque d'eau :	99
6.2.3	Mauvaise état sanitaire de la végétation et carence en chlorophylle :	99
6.2.4	Prévention de la carence et la toxicité ferreuses :	100
6.2.5	Entretien d'un terrain argileux :	100
6.2.6	Prévention du risque incendie en milieu agricole :	101
6.2.7	Dégradation du sol :	101
6.2.8	Manque en matières organiques :	102
6.3	Conclusion :	105
7	Modulation des intrants :	107
7.1	Introduction :	107
7.2	La carte de préconisation :	107
7.3	Modulation des intrants :	108
7.4	Le monitoring en temps réel :	109
7.4.1	Introduction :	109
7.4.2	Qu'est-ce qu'un capteur ?	109
7.4.3	Capteurs proposés :	109
7.5	Conclusion :	113
	Conclusion et perspectives :	114
	Références bibliographiques :	115
	Annexes :	117



## **Liste des tableaux :**

### **Chapitre 5 :**

<b>Tableau 1 :</b> Les bandes spectrales de Landsat 8.....	69
<b>Tableau 2 :</b> Les bandes spectrales de Sentinel 2.....	70
<b>Tableau 3 :</b> ArcGIS Pro éléments du ruban.....	75

### **Chapitre 6 :**

<b>Tableau 1 :</b> Les teneurs de référence limites en métaux lourds des boues..	104
<b>Tableau 2 :</b> Valeurs limites en agents pathogènes.....	104
<b>Tableau 3 :</b> Valeurs limites en micro-organismes.....	104

## **Listes des figures :**

### **Chapitre 2 :**

<b>Figure 1 :</b> Symptômes de carence en azote.....	23
<b>Figure 2 :</b> Érosion dans un champ.....	28

### **Chapitre 3 :**

<b>Figure 1 :</b> Exemple d'un drone (droite), d'un ULM (centre) et d'un satellite (gauche).....	30
--	----

### **Chapitre 4 :**

<b>Figure 1 :</b> Le diagramme de dispersion ou des bandes spectrales rouge et proche infrarouge.....	42
<b>Figure 2 :</b> Comparaison du rapport et de la différence entre bandes pour deux points illuminés différemment.....	43
<b>Figure 3 :</b> Variation de la température de surface en fonction de NDVI....	47
<b>Figure 4 :</b> Comportement du NDVI, PVI, et des isolignes de végétation dans l'espace spectral R-PIR.....	50
<b>Figure 5 :</b> Influence du sol (clair et foncé) sur le SAVI en fonction du facteur correctif L.....	51

### **Chapitre 5 :**

<b>Figure 1 :</b> La zone d'étude.....	62
<b>Figure 2 :</b> La station d'épuration de Boumerdès.....	63
<b>Figure 3 :</b> Schéma de la STEP de BOUMERDES.....	68
<b>Figure 4 :</b> La correction atmosphérique en utilisant QGIS.....	71
<b>Figure 5 :</b> Composite bands en utilisant ArcGis.....	72
<b>Figure 6 :</b> La résolution de la bande multispectrale.....	72
<b>Figure 7 :</b> Bande multispectrale avant la correction atmosphérique.....	73
<b>Figure 8 :</b> Bande multispectrale après la correction atmosphérique.....	73
<b>Figure 9 :</b> Les éléments du ruban.....	74
<b>Figure 10 :</b> Localisation de Boumerdès.....	75
<b>Figure 11 :</b> Délimitation de la zone d'étude.....	76
<b>Figure 12 :</b> Carte de la zone d'étude.....	77
<b>Figure 13 :</b> Calcul des indices de végétation.....	77
<b>Figure 14 :</b> Saisie des bandes.....	78
<b>Figure 15 :</b> Création de la carte d'indice de végétation.....	78
<b>Figure 16 :</b> Répartition de NDVI dans la zone d'étude.....	79
<b>Figure 17 :</b> Répartition de Green NDVI dans la zone d'étude.....	80
<b>Figure 18 :</b> Répartition de Rededge-NDVI dans la zone d'étude.....	81
<b>Figure 19 :</b> Répartition de VARI dans la zone d'étude.....	82
<b>Figure 20 :</b> Répartition de SR dans la zone d'étude.....	83
<b>Figure 21 :</b> Répartition de Rededge SR dans la zone d'étude.....	84
<b>Figure 22 :</b> Répartition de MTVI 2 dans la zone d'étude.....	85
<b>Figure 23 :</b> Répartition de RTVI- core dans la zone d'étude.....	86

<b>Figure 24</b> : Répartition de CI-Rededge dans la zone d'étude.....	86
<b>Figure 25</b> : Répartition de CI-Green dans la zone d'étude.....	87
<b>Figure 26</b> : Répartition de MNDWI dans la zone d'étude.....	88
<b>Figure 27</b> : Répartition de NDMI dans la zone d'étude.....	89
<b>Figure 28</b> : Répartition d'oxyde de fer dans la zone d'étude.....	90
<b>Figure 29</b> : Répartition des minéraux ferreux dans la zone d'étude.....	91
<b>Figure 30</b> : Répartition des minéraux argileux dans la zone d'étude.....	92
<b>Figure 31</b> : Répartition de NDBI dans la zone d'étude.....	93
<b>Figure 32</b> : Répartition de NBR dans la zone d'étude.....	94
<b>Figure 33</b> : Répartition de BAI dans la zone d'étude.....	95
<b>Figure 34</b> : Calcul de l'indice de forme.....	96
<b>Figure 35</b> : Répartition de l'indice de forme dans la zone d'étude.....	96
<b>Figure 36</b> : Distinction des sols dégradés aux sols développés.....	97

## **Chapitre 6 :**

<b>Figure 1</b> : Brise-vent.....	100
<b>Figure 2</b> : Sol dégradé.....	101
<b>Figure 3</b> : Stockages des boues de la STEP à la parcelle.....	103

## **Chapitre 7 :**

<b>Figure 1</b> : Carte de préconisation.....	107
<b>Figure 2</b> : Zones agricoles avec différents degrés d'hétérogénéité.....	108
<b>Figure 3</b> : Capteur GreenSeeker.....	110
<b>Figure 4</b> : Monitor Watermark.....	110
<b>Figure 5</b> : Graphique Monitor cas : stabilité des tensions.....	111
<b>Figure 6</b> : Graphique Monitor cas : augmentation des tensions.....	111
<b>Figure 7</b> : Graphique Monitor cas : diminution des tensions.....	112
<b>Figure 8</b> : Graphique Monitor cas : augmentation et diminution des tensions.....	112
<b>Figure 9</b> : Graphique Monitor cas : stabilisation et augmentation des tensions.....	112
<b>Figure 10</b> : Capteur de LAI.....	113

## **Liste des sigles :**

**REUE** : Réutilisation des eaux usées épurées

**STEP** : Station d'épuration

**MES** : Matières en suspension

**PH** : Potentiel hydrogène

**SIG** : Système d'informations géographiques

**DN** : Digital number = Nombre numérique

**EH** : Equivalent habitant

**GPS** : Global Positioning System

**LAI** : Leaf area index

**ULM** : planeur ultra-léger motorisé

**QGIS** : Quantum Geographic information system

**SCP** : Semi-automatic classification plugin

**DOS 1** : Dark Object Subtraction 1

**TOA** : Top of atmosphere

**DVI** : L'indice différentiel de végétation

**NDVI** : L'indice de végétation par différence normalisé

**Clg** : Chlorophyll Index - Green, Indice chlorophyllien vert

**Clre**: Chlorophyll Index - Red-Edge, Indice chlorophyllien - Red Edge

**GNDVI** : Green Normalized Difference Vegetation Index, Indice de végétation par différence normalisée vert.

**MTVI2** : Modified Triangular Vegetation Index, Indice de végétation triangulaire modifié

**NDVIre** : Red-Edge NDVI, NDVI Red Edge

**RTVICore** : Red-Edge Triangulated Vegetation Index, Indice de végétation triangulé Red Edge

**TDVI** : L'indice de température, végétation et sécheresse.

**PVI** : L'indice perpendiculaire de végétation.

**SAVI** : L'indice de végétation ajusté pour le sol.

**TSAVI** : L'indice transformé de végétation ajusté pour le sol

**MSAVI** : L'indice modifié de végétation ajusté pour le sol

**WDVI** : Weighted Difference Vegetation Index.

**ARVI** : Atmospherically Resistant Vegetation Index

**VARI** : Indice de résistance atmosphérique visible

**SR** : Simple Ratio et **RVI** : Ratio Vegetation Index.

**SRre**: Red-Edge Simple Ratio, Ratio simple Red Edge

**GEMI** : Global Environment Monitoring Index

**EVI** : L'indice de végétation amélioré

**NDSI** : L'indice de neige par différence normalisée

**MNDWI** : L'indice d'eau de différence normalisée modifiée

**NDMI** : L'indice d'humidité par différence normalisé

**BAI** : L'indice de zone de combustion

**NBRI** : L'indice de rapport de combustion normalisé

**NDBI** : L'indice de construction de différence normalisée .

**IF** : Indice de forme

**DBO<sub>5</sub>** : Demande biochimique en oxygène

**ERU** : eaux résiduaires urbaines

**ETM** : Eléments traces métalliques

**CTO** : Composés Traces Organiques

**EE** : Earth Explorer

**NFU** : National Farmers' Union

## **Introduction générale :**

L'Algérie de par sa position géographique et son climat contrasté méditerranéen au nord à tendance semi aride à aride dans sa partie centrale et méridionale, est confrontée de plein fouet aux exigences du changement climatique mondial. Ce qui affecte déjà la disponibilité en quantité, mais aussi en qualité de ses ressources en eau.

Une des options valorisables qui s'offre à l'Algérie est la réutilisation de toutes les ressources disponibles, notamment non conventionnelles et en particulier celles rejetées à partir des stations d'épuration urbaines et/ou industrielles. Ces volumes rejetés dans les hydro-systèmes littoraux, fluviaux et/ou chotts peuvent être utilisés avantageusement en fin d'irrigation. Cela permettra d'augmenter sensiblement sa surface irriguée en eau épurée prévisionnelle à un million de m<sup>3</sup>.

Néanmoins, l'impact d'une irrigation à partir d'une ressource non conventionnelle sur les cultures irriguées mais aussi sur les sols doit être étudiés et suivis finement. En effet, les eaux non conventionnelles épandées sur des surfaces agricoles peuvent générer des impacts négatifs sur les cultures, mais aussi les sols non encore compris à ce jour et font actuellement l'objet d'efforts de recherches accrues dans le monde mais aussi dans notre espace euro-méditerranéen dont le contexte de proximité climatique et géographique commun permet avantageusement d'établir un benchmarking fructueux en termes de recherche mais aussi de bonnes pratiques d'irrigation et de suivi.

Ce travail représente les premières étapes à suivre pour détecter les problèmes en agriculture et éviter toute perte de rendement agricole et donc de maximiser les rendements. Mais il serait intéressant de procéder à une étude qui utilise des données sur le type de végétation et du sol et des mesures in-situ pour restituer la carte de préconisation et déterminer les paramètres biophysiques de toute la région en se basant sur la corrélation entre les indices de végétation et les mesures in-situ.

Des travaux scientifiques ont montré qu'en Algérie les pertes en rendement des céréales pouvaient atteindre plus de 40 % dues à un déficit pluviométrique persistant. Ce qui oblige l'Algérie à un recours à leurs importations. Toutes les options sont ouvertes pour améliorer les performances.

Pour maximiser le rendement en agriculture et piloter l'irrigation des cultures afin d'éviter les pertes en eau en améliorant ainsi les divers efficiences de la végétation, l'Algérie doit s'orienter vers le monitoring en agriculture qui permet un gain en temps et en énergie et donne des résultats satisfaisants en termes de qualité et quantité du rendement.

Le monitoring est l'anglicisme du mot surveillance et c'est l'ensemble des techniques permettant d'analyser et contrôler les activités pour assurer le respect des objectifs ciblés.

En appliquant cette définition à l'agriculture, on obtient la surveillance de l'état des cultures dans le but de fournir en temps utile des informations suffisantes pour la gestion des cultures et la prévision précoce du rendement.

Mais quelle est la méthode et les outils qu'on doit utiliser pour atteindre le but ciblé ?

Afin de traiter le sujet et répondre aux questionnements émis, un plan de recherche a été établi. Il consiste d'abord à faire une recherche sur les derniers avancements (logiciels, méthodes utilisées,...) dans le monitoring en agriculture en prenant des notes des conférences

publiées en ligne sur ce thème, collecter les données disponibles et la recherche théorique a été complété par de nombreuses lectures sur le sujet.

L'objectif de cette étude c'est comprendre comment détecter les problèmes et les résoudre pour éviter toute perte en qualité ou quantité du rendement.

Nous verrons dans un premier temps qu'il est nécessaire de présenter la réutilisation des eaux usées épurées et les boues en agriculture. Nous devons également tenter de déterminer les paramètres qu'on doit contrôler et comment détecter sans contact physique les problèmes avant finalement de proposer les procédures à suivre pour une meilleure qualité et un maximum de rendement.

**Chapitre 1**  
**La réutilisation des**  
**eaux usées épurées**



# 1 Réutilisation des eaux usées épurées :

## 1.1 Introduction :

La réutilisation des eaux usées épurées est une pratique très répandue dans le monde et essentiellement dans les régions affectées par des pénuries de ressources en eau.

Par définition, la réutilisation des eaux épurées est une action volontaire et planifiée qui vise la production des quantités complémentaires en eau pour différents usages afin de combler les déficits.

Les eaux usées après épuration en station et traitement complémentaire sont appelées eaux usées épurées. Elles sont employées pour des usages agricoles, industriels et urbains au lieu d'être rejetées dans les milieux récepteurs.

La réutilisation d'eaux usées épurées pourrait ainsi avoir de nombreuses applications comme :

- Réutilisation pour l'irrigation : cultures fourragères ou maraichères, céréales, prairies, etc.
- Réutilisation industrielle : circuit de refroidissement, construction, papeteries, industries textiles, etc.
- Réutilisation en zone urbaine : lutte contre l'incendie, lavage de voirie, recyclage des eaux usées d'un immeuble, arrosage de parcs, golfs, cimetières, etc.
- La production d'eau potable ;
- La recharge de nappe phréatique.

Etant donné que plus de 70% de l'eau est utilisée par l'agriculture et les autres 30% partagés pour les besoins de consommation humaine, commerciale et industrielle, la majorité des projets de réutilisation des eaux usées épurées ont une vocation agricole et sont principalement destinés à l'irrigation.

La diversité des utilisations des eaux usées épurées a rendu la qualité de l'eau réutilisée est d'une importance capitale.

## 1.2 Irrigation au moyen d'eaux usées épurées :

### 1.2.1 Les avantages et les risques :

L'irrigation est l'activité humaine qui consomme le plus d'eau. La réutilisation agricole des eaux épurées comme moyen d'économiser la ressource a donc été une des premières voies de développement des projets de REUE. En effet, elle évite que les stations d'épuration rejettent leurs effluents polluants dans le milieu récepteur.

La réutilisation des eaux usées en agriculture apporte des bénéfices supplémentaires et améliore, dans certains cas, les rendements des cultures.

Ces bénéfices ne résident pas seulement dans la préservation du milieu et de la ressource, mais aussi dans la nature des eaux usées. En effet, elles contiennent des éléments fertilisants

(azote, phosphore et potassium) ainsi que des oligo-éléments (fer, cuivre, manganèse, zinc, etc.) qui sont bénéfiques pour les cultures, et qui peuvent augmenter significativement le rendement. Les matières en suspension contribuent également à la fertilisation des sols car elles sont riches en matière organique. L'utilisation d'eaux usées épurées à la place d'engrais de synthèse coûteux, est économiquement intéressante pour les agriculteurs.

Le bénéfice d'une REUE peut donc être double :

- Au niveau économique, car en plus d'une préservation quantitative de la ressource, les agriculteurs font des économies d'engrais ;
- Au niveau écologique, car en plus de la diminution des rejets d'eaux usées dans le milieu, la pollution agricole diminue.

Néanmoins, il y a lieu de prendre certaines précautions quant à l'apport en excès de ces éléments fertilisants. Il y a en effet un triple risque :

- **Un risque sanitaire** : les MES protègent les micro-organismes de beaucoup de traitements, comme les traitements au chlore ou aux ultraviolets. Il existe donc une compétition entre l'élimination des micro-organismes et la préservation des MES en vue d'une utilisation agricole;
- **Un risque technique** : si les MES sont présentes en trop grand nombre, elles peuvent entraîner le bouchage des canalisations des systèmes d'irrigation ;
- **Un risque agronomique et environnemental** : il est possible que les éléments soient apportés en excès. Dans ce cas, il y a un risque de pollution des sols et de diminution du rendement. Les taux en éléments nutritifs (nitrate essentiellement) et la salinité de l'eau utilisée (cause de la dégradation des sols) sont de première importance. Il faut donc trouver le bon équilibre entre le niveau de traitement, les besoins des cultures et la nature du sol.

L'utilisation d'eaux épurées pour l'irrigation doit donc se faire avec précaution.

### 1.2.2 Paramètres physico-chimiques prises en compte :

Les paramètres physico-chimiques pris en compte dans le cadre du projet, sont ceux usuellement mesurés pour une eau usée urbaine.

#### 1.2.2.1 Paramètres physiques:

Température de l'eau, pH, conductivité, turbidité, l'ion bicarbonate  $\text{HCO}_3$ , le titre hydrotimétrique TH et le titre alcalimétrique TAC.

#### 1.2.2.2 Paramètres chimiques:

Demande biochimique en oxygène ( $\text{DBO}_5$ ), la demande chimique en oxygène (DCO), matières en suspension (MES), azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4$ ), phosphate total (Pt), Orthophosphates  $\text{PO}_4^{-3}$ , Azote total (Nt), Nitrates ( $\text{NO}_3$ ) et Nitrites ( $\text{NO}_2$ ), sulfate ( $\text{SO}_4$ ),...etc.

#### 1.2.2.3 Paramètres microbiologiques:

Coliformes fécaux, coliformes totaux, oeufs d'helminthes, Salmonelles, clostridium SR, Streptocoques.

### 1.3 Valorisation des boues :

Les boues fraîches représentent une suspension plus ou moins concentrée qui est caractérisée par une haute teneur en matières organiques. Elles sont donc fermentescibles et nauséabondes. De plus, elles contiennent aussi de fortes concentrations en germes pathogènes.

En raison de leur constitution et du volume produit, les boues fraîches d'épuration représentent donc en premier lieu un déchet pouvant créer des nuisances majeures ainsi que des risques pour le milieu naturel et la santé humaine. Par contre, elles constituent une source riche des éléments fertilisants et surtout en matières humiques qui contribuent à la formation de l'humus et à l'amélioration du pouvoir de rétention d'eau du sol.

#### 1.3.1 Risques de contamination :

Les boues de station de Boumerdès ne contiennent pas seulement les éléments fertilisants mais aussi des éléments indésirables et dangereux pour l'homme, les animaux ou l'environnement : ce sont les agents pathogènes et les contaminants chimiques.

##### 1.3.1.1 *Les agents pathogènes :*

Dans les eaux usées et les boues de station d'épuration, on trouve une flore microbienne sans danger, mais on rencontre aussi des agents pathogènes dangereux (bactéries, virus, parasites...). Ces agents sont présents en faible concentration, mais celle-ci est très variable selon les conditions de collecte et de traitement.

##### 1.3.1.2 *Les contaminants chimiques :*

Les principaux polluants à surveiller en priorité sont les métaux dits "lourds", ainsi que certaines familles de molécules organiques peu biodégradables.

##### 1.3.1.2.1 **Les métaux lourds ou éléments traces métalliques (ETM) :**

Cuivre, zinc, plomb, cadmium, chrome, nickel, mercure, auquel il faut adjoindre un métalloïde le sélénium.

Le consommateur est exposé par l'intermédiaire des denrées végétales qui ont fait l'objet de ce mode de fertilisation, mais aussi par les denrées (lait, viande, œufs...) qui proviennent des animaux qui auraient eux-mêmes consommé des fourrages cultivés sur des terres ayant reçues des boues de STEP. De plus, les animaux peuvent absorber ces métaux, non seulement par leurs aliments, mais aussi par la consommation directe de terre, qui n'est pas négligeable.

##### 1.3.1.2.2 **Les Composés Traces Organiques (CTO) :**

Parmi les différentes familles de micropolluants organiques couramment recherchées (les hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, les polychlorobiphényles PCB, les chlorophénols, les dioxines, etc...).

Les HAP, PCB et dioxines sont des molécules très stables, qui sont peu dégradées par les processus d'épuration de l'eau.

Le risque d'accumulation dans la chaîne alimentaire après épandage des boues est moindre que dans le cas des ETM d'une part, en raison des capacités de dégradation du sol d'autre part,

parce que ces molécules sont très peu hydrosolubles et sont donc très peu absorbées par les racines.

#### **1.4 Conclusion :**

La réutilisation des eaux usées épurées est une technique répandue dans les pays déficitaires en eau comme l'Algérie. Mais cette technique doit être utilisée avec précaution et suivi continu des différents paramètres pour éviter toute nuisance sur la santé des êtres vivants. La REUE est la solution du manque d'eau rencontré par l'Algérie, il nous reste la solution du problème des pertes du rendement qui est le monitoring.

**Chapitre 2**  
**Le monitoring en**  
**agriculture**

## 2 Le monitoring en agriculture :

### 2.1 Définition du monitoring en agriculture :

Le monitoring signifie surveillance en anglais et définit la mesure d'une activité (humaine, économique, électrique, d'un organe, etc...). C'est l'ensemble de techniques permettant d'analyser, de contrôler, de surveiller les activités en cours pour s'assurer qu'elles respectent les objectifs ciblés.

En appliquant cette définition à l'agriculture, cela se matérialise par une surveillance de l'état des cultures dans le but de fournir en temps utile des informations suffisantes pour la gestion des cultures et la prévision précoce du rendement.

Au niveau de l'agriculteur, cela se traduit par une assurance de la santé de la culture en adéquation avec son stade de croissance mais aussi en termes de carence des nutriments, d'irrigation adéquate, d'état de maîtrise de croissance des mauvaises herbes, d'infestation de parasites, etc...

Au niveau national, il donne une estimation du rendement total avant la récolte et permet la maximisation du rendement.

Mais quels sont les paramètres que l'on doit contrôler afin de bénéficier du maximum des avantages liés à l'usage du monitoring ?

### 2.2 Paramètres à contrôler dans l'agriculture :

Pour bien gérer les zones agricoles, il faut préciser les paramètres à contrôler, en s'assurant que les normes soient respectées. Ces paramètres concernent l'état sanitaire et nutritif de la végétation. Les paramètres les plus importants à considérer sont :

- L'indice de surface foliaire « LAI ».
- Les matières organiques.
- Les éléments nutritifs.
- La chlorophylle.
- L'argile.
- L'eau.

#### 2.2.1 L'indice de surface foliaire :

##### 2.2.1.1 Définition :

L'**indice de surface foliaire** (En anglais Leaf Area Index, d'où l'acronyme **LAI**) est une mesure de surface foliaire par unité de surface du sol et est un paramètre essentiel pour l'étude des forêts et des couvertures agricoles.

Cette définition peut être appliquée sans difficultés aux arbres à feuilles caduques, parce que les deux côtés de la feuille ont la même zone. Dans le cas de conifère, caractérisé par des aiguilles dans une section transversale circulaire ou semi-circulaire, cette définition ne peut être acceptée car il ne représente pas la surface d'échange réelle. Pour éviter le problème en

raison de la forme des feuilles, certains auteurs ont proposé de changer le paramètre, l'introduction de la surface foliaire projetée. De cette façon, ils ont réduit les problèmes dus à la forme des aiguilles et des feuilles, mais l'angle de projection n'est pas unique. Cela a incité Myneni et al. (1997) pour définir la LAI comme la surface foliaire projetée maximale par unité de surface.

Le LAI est toujours donné par le rapport de deux surfaces donc d'un point de vue strictement mathématique, il doit être considéré comme un paramètre adimensionnel. En fait, il est donné que le rapport est compris entre la surface de la feuille et la surface du sol, d'un point de vue physique, les deux unités ne se compensent pas. Donc, est plus correctement LAI exprimée en mètres carrés de feuillage sur le compteur cadre de terrain ( $m^2 / m^2$ ).

L'indice de surface foliaire dépend de certains facteurs tels que: la composition spécifique, le stade de développement de la forêt, les conditions du site dans lequel il est mesuré le paramètre et la méthode par laquelle il est mesuré. Le LAI est extrêmement variable, au printemps et à l'automne peut aussi changer de jour en jour, et suivant la dynamique du développement des changements forestiers d'année en année. Dans la forêt mûre varie en réponse à la variabilité du climat, en raison des années sèches ou humides, en présence de gelées tardives et précoces et d'autres facteurs qui exercent leur variabilité au fil des ans.

#### 2.2.1.2 *L'importance de l'indice de surface foliaire :*

- L'indice foliaire ou LAI est un paramètre important pour la détermination de la pénétration de la lumière dans la canopée, modélisation de plusieurs processus comme la photosynthèse du feuillage ou bien l'évapotranspiration. Ses propriétés de réflectance sont caractérisées par une absorption des rayonnements dans le domaine du visible (rouge, vert, bleu), une réflexion pour l'infrarouge (totale) et une part pour le vert.

- L'indice foliaire ne doit pas être trop important pour éviter les évaporations trop fortes, ni trop faibles pour ne pas perdre de captation lumineuse. Pour une utilisation maximale des ressources, sélectionner un indice foliaire compris entre 2,5 et 3. La transpiration est plus modérée et l'interception lumineuse est non limitante.

Quand l'indice foliaire est trop faible ( $< 2,5$ ) alors l'interception lumineuse est limitante et le rendement n'est pas maximum.

Lorsque l'indice foliaire est trop élevé ( $> 3$ ), la transpiration augmente. Les ressources en eau et en éléments minéraux sont gaspillées. Les risques de maladies, de verse et d'accélération de la sénescence foliaire sont augmentés.

#### 2.2.2 *L'eau :*

Afin de préserver la vie de la faune du sol et d'améliorer la germination et la croissance des plantes, l'eau dans le sol est un élément déterminant à la vie des végétaux. Il faut surveiller le taux d'humidité dans les sols afin d'optimiser les décisions d'irrigation, amener juste la quantité nécessaire d'eau pour dynamiser la vigueur des plants, maximiser les rendements des cultures, favoriser une récolte de qualité, assurer que la résistance des cultures aux maladies soit effective et bien sur diminuer les coûts d'irrigation. Et dans le cas de la réutilisation des eaux usées épurées, il faut surveiller d'une façon continue la qualité de l'eau utilisée.

### 2.2.3 La chlorophylle :

La feuille d'un végétal comporte généralement des tissus chlorophylliens et présente une grande surface par rapport à son volume : c'est une grande surface réceptrice de la lumière mais aussi le lieu des échanges gazeux avec l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O). La feuille est spécialisée dans la photosynthèse et dans les phénomènes de transpiration. La photosynthèse est le processus qui transforme l'énergie lumineuse en énergie chimique afin de rendre possible la production de molécules organiques.

Les pigments de chlorophylle absorbent les photons de lumière bleue (vers 430 nm) et les photons de lumière rouge (vers 660 nm). Les chlorophylles sont de couleur verte car elles absorbent très faiblement les radiations vertes. C'est pour cela que pour notre œil humain les végétaux chlorophylliens sont verts !

La chlorose c'est la carence en chlorophylle des plantes se traduisant par la coloration jaune pâle des organes qui devraient être verts (feuilles, tiges) et pouvant avoir des causes diverses (anomalie génétique, infections parasitaires, carence du sol en nutriments, ...etc).

### 2.2.4 Les éléments nutritifs :

#### 2.2.4.1 *Les principaux éléments nutritifs :*

Une plante a besoin d'eau, de lumière et d'éléments nutritifs pour croître, se développer et fructifier.

L'azote, le phosphore et le potassium sont les principaux éléments nutritifs dont la plante a besoin. La plante puise également des éléments indispensables en plus petites quantités (calcium, magnésium, soufre...) et des oligo-éléments en très petites quantités (fer, manganèse, zinc, cuivre, bore, molybdène...).

#### 2.2.4.2 *Carence en nutriments :*

On parle de carence lorsqu'un végétal ne peut disposer de tous les éléments nutritifs (éléments minéraux et oligo-éléments) nécessaires à sa croissance. Mais divers facteurs peuvent amener le végétal en situation de carence :

- L'absence ou la diminution des quantités de nutriments dans le sol due à des pratiques agricoles épuisantes (monoculture, sol laissé à nu...) et/ou à des conditions climatiques défavorables (pluies intenses et lessivage des sols).
- Le blocage de l'assimilation des nutriments présents dû, soit à un pH trop acide ou trop alcalin, soit à la présence en excès d'un nutriment.

#### 2.2.4.2.1 Carences en azote (N) :

L'azote est un élément fondamental pour le développement du végétal ; principal constituant de la chlorophylle et des protéines, il stimule la croissance des plantes.



#### 2.2.4.2.1.1 Signes visibles de carence en azote :



**Figure 1 : Symptômes de carence en azote**

En cas de manque d'azote, la plante présente une croissance retardée, des tiges et des feuilles de petit format, les feuilles les plus anciennes qui jaunissent, puis qui tombent. Les tiges peuvent parfois rougir. La floraison et la fructification sont également touchées (fruits petits, de qualité médiocre et mûrs précocement).

#### 2.2.4.2.1.2 Correction d'une carence en azote :

L'excès d'humidité est une des causes principales de la disparition de l'azote. Pour éviter les lessivages et enrichir le sol en azote, aérez le sol, reformez la couche d'humus (grande source d'azote), cultivez des engrais verts et effectuez des apports d'engrais organiques ou minéraux : poudre de sang (action coup de fouet), corne broyée, purin de consoude...

#### 2.2.4.2.2 Carences en phosphore (P) :

Le phosphore favorise le développement du système racinaire et régularise la mise à fleurs et le développement et la maturation des fruits. Il permet un développement harmonieux de la plante.

##### 2.2.4.2.2.1 Symptômes de carence en phosphore :

Les signes visibles de carence : la plante reste petite et raide. La pointe des feuilles se colore (vert foncé à pourpre), la floraison est retardée voire nulle, et les fruits sont rares, de petit calibre et acides.

##### 2.2.4.2.2.2 Correction d'une carence en phosphore :

Les milieux acides et alcalins rendent difficiles l'assimilation du phosphore par les plantes. Le froid et l'humidité sont aussi des facteurs aggravants. Pour corriger ce type de carence :

- Effectuez des amendements humiques (compost, fumier, engrais verts, paillis...) ; cela permet de corriger le pH, de pourvoir le sol en phosphore assimilable et d'alléger (pour un meilleur développement des racines) et drainer le sol.
- Pour compléter, effectuez des apports de farine de poisson, de poudre d'os ou de phosphate naturel (pour sols acides).

#### 2.2.4.2.3 Carences en potassium (K) :

Le potassium joue un rôle de régulateur des fonctions vitales de la plante : assimilation de la chlorophylle, résistance aux maladies, au froid et à la sécheresse, régulation de la transpiration...

##### 2.2.4.2.3.1 *Symptômes de carence en potassium :*

Les plantes sont peu développées, la bordure des feuilles varie du jaune au brun, le limbe se couvre de taches brunes.

##### 2.2.4.2.3.2 *Correction d'une carence en potassium :*

Pour enrichir le sol en potasse, effectuez des apports de matière organique, comme le compost (en se décomposant, elle libère du potassium disponible). La consoude est également une bonne pourvoyeuse, comme la cendre (lessivable) ou la poudre de roche (libération lente). Et sachant que le potassium est moins assimilable en milieu acide, on doit assurer un milieu basique.

#### 2.2.4.3 *Le rôle des autres éléments :*

Les autres éléments sont également des éléments importants pour les équilibres métaboliques des végétaux. Ces éléments sont nécessaires en très petites quantités, et la plupart du temps, ils sont présents dans le sol ou dans l'eau de façon suffisante pour subvenir aux besoins des plantes.

Dans ce projet, on va s'intéresser au fer seulement.

##### 2.2.4.3.1 Le fer :

###### 2.2.4.3.1.1 *Définition du fer :*

Le fer est nécessaire à toute forme de vie sur Terre sauf quelques unes. Le fer entre aussi dans la composition de plusieurs enzymes qui jouent un rôle dans la respiration, fixation d'azote et la photosynthèse (en participant notamment à la synthèse de la chlorophylle).

###### 2.2.4.3.1.2 *Oxyde de fer :*

Un oxyde de fer est un composant chimique qui résulte de la combinaison d'oxygène et de fer.

Il en existe trois, différant par l'état d'oxydation de leurs atomes de fer :

- **Oxyde de fer(II)  $\text{FeO}$  ou oxyde ferreux**, et wustite sous sa forme minérale.
- **Oxyde de fer (II,III)  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$** , sesquioxyde de fer parfois appelé **oxyde magnétique**, et magnétite sous sa forme minérale.
- **Oxyde de fer(III)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$** , également appelée **oxyde ferrique**.

Les oxydes de fer donnent aux sols leurs couleurs et permettent d'en déterminer leur degré de drainage (sol jaune brun « rouillé » en profondeur pour les sols bien drainés et sols grisâtres dans les mal drainés). Les minéraux contenant du fer (principalement oxydes et hydroxydes

de fer) font partie, après les argiles, des minéraux les plus importants du sol, jouant un rôle fondamental dans les processus de pédogénèse.

Dans un terrain bien aéré, le fer est trivalent ( $\text{Fe}^{3+}$ ) et prend la forme d'oxyde ferrique ou d'hydroxyde ferrique, qui est peu soluble et sa solubilité dépend fortement du PH, et la solution du sol n'en contient donc qu'une faible quantité. Il n'est d'ailleurs pas rare que les plantes aient une carence en fer.

En revanche, dans un terrain gorgé d'eau en permanence, le fer prend la forme de l'ion ferreux ( $\text{Fe}^{2+}$ ), et sa solubilité augmente. La teneur en fer dans la solution du sol dépasse alors les besoins des plantes, et il devient toxique pour beaucoup d'espèces.

#### *2.2.4.3.1.3 Les symptômes et conséquences d'une toxicité ferreuse :*

Les toxicités (en Fe,  $\text{H}_2\text{S}$ , acides organiques. . .) provoquent un déséquilibre dans la physiologie de la plante et se manifestent par différents symptômes - taches sur les feuilles, mauvaise floraison, mauvais rendements - parfois identifiés sous le nom de maladies d'Akiochi , d'Akagare, .

Malgré la difficulté d'identifier les symptômes, certaines manifestations observées au niveau des feuilles, sont généralement attribuées à une toxicité ferreuse. Deux principaux types de manifestations de cette toxicité ont été décrits dans la littérature :

- **Le bronzage** : apparition de taches éparées de couleur brun-rouge sur les feuilles les plus basses, extension de ces taches, les feuilles deviennent brunes puis de couleur gris foncé et meurent;

- **Le jaunissement** : apparaît sur les feuilles les plus basses, partant de la pointe des feuilles, il progresse vers leurs bases. Ce jaunissement vire parfois à des couleurs plus vives jaune foncé, orange et des stries brunes peuvent être discernables. Les feuilles sont peu à peu affectées par le jaunissement, tandis que les plus basses meurent.

L'absorption excessive de fer est aggravée par des déficiences en phosphore **P** (affaiblissement de l'état énergétique de la plante), en calcium **Ca** (augmentation de la perméabilité des membranes des cellules racinaires) et potassium **K** (accumulation de substances carbonées dans la sève) qui provoquent une augmentation de l'exsudation organique par les racines, du nombre et de l'activité des micro-organismes réducteurs et par conséquent, une forte accumulation d'ions ferreux au contact de la racine, susceptibles d'être absorbés par la plante.

## **2.2.5 L'argile :**

### *2.2.5.1 La texture du sol :*

La texture du sol correspond à la répartition dans ce sol des minéraux par rapport à leurs diamètres indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux.

Les particules sont classées en fonction de leur diamètre à :

Sables : > 50  $\mu\text{m}$   
Limons : de 50  $\mu\text{m}$  à 2  $\mu\text{m}$   
Argiles : < 2  $\mu\text{m}$

Tous les sols ne sont pas égaux. Leur texture est l'une des caractéristiques de base qui les distinguent les uns des autres. La texture résulte du mélange de particules de différentes tailles dans le sol. Chaque texture de sol comporte des risques particuliers donc il est important de connaître la texture du sol de l'exploitation agricole pour bien adopter les pratiques de gestion visant à maximiser la productivité en réduisant au minimum les effets néfastes sur l'environnement. Dans ce présent projet on s'intéresse aux argiles.

#### 2.2.5.2 *Définition de l'argile :*

En géologie, on appelle "argile" les minéraux d'une roche qui mesurent moins de 2 µm (micromètres). Pour cette raison, le sol argileux est extrêmement lourd et compact.

#### 2.2.5.3 *Avantages et... inconvénients :*

Avoir un sol argileux est à la fois un atout et une contrainte :

##### 2.2.5.3.1 Avantages :

- ✓ Un sol argileux est riche en éléments fertilisants et retient bien l'eau. La rétention d'eau, qui évite le dessèchement trop rapide des cultures.
- ✓ Ces sols se travaillent facilement si la teneur en eau est correcte.
- ✓ Quand l'hiver est froid, l'argile gèle et donne une structure agrégée très favorable à la couche superficielle du sol.
- ✓ Ce type de sol a tendance à être légèrement alcalin, ce qui convient pour les plantes qui ne poussent pas dans les sols acides.

##### 2.2.5.3.2 Inconvénients :

- Il laisse difficilement passer l'eau :

- En période de sécheresse, il devient très dur et peut se fendiller. La réhydratation est alors longue et difficile.
- Par temps humide, l'eau a tendance à s'accumuler à la surface du sol, ce qui le rend boueux et collant.

- Il est lourd, peu drainé, et lent à se réchauffer. Il est dur à travailler.

Si le sol est trop lourd avec de l'argile, cependant, la composition dense peut décourager la croissance des plantes en bonne santé et étouffer les racines des plantes qui poussent dans les pelouses, les jardins et les parterres de fleurs.

- Les sols riches en argile sont propices à l'agriculture en zone aride mais dans l'autre côté, la structure superficielle des sols argileux peut se dégrader, formant une croûte. L'encroûtement limite l'infiltration et accroît le ruissellement.

- Les sols argileux peuvent également être très sensibles à l'érosion éolienne à cause de la sécheresse qui peut causer la pulvérisation de la couche superficielle des argiles lourdes ce qui la rend sensible à l'érosion éolienne. Donc on peut favoriser la protection de la structure superficielle en réduisant au minimum le travail des sols argileux et en conservant les résidus végétaux.

- Un sol argileux a pour particularité d'absorber l'eau. En période de pluie, le sol va gonfler et en période très sèche, il va au contraire se rétracter. Ces mouvements de gonflement et de

rétractation ont des conséquences sur l'habitation construite sur le sol argileux si les fondations ne sont pas adaptées puisque cela va créer de fissures qui vont rendre instable voir dangereuse ladite habitation.

Avant de construire, il est conseillé de vérifier une carte géologique du terrain qui pourra informer sur la nature du sol. Il est aussi recommandé d'éviter de construire à côté d'une végétation très dense qui peut être gourmande en eau car cela peut influencer sur l'humidité du sol argileux. Si le sol est peu argileux, la profondeur de la fondation devra être de 0.8 m au minimum. Si le sol est très argileux, la profondeur minimum sera de 1.2 m. Il reviendra au géotechnicien de déterminer avec exactitude quelle devra être la profondeur des fondations sur un sol argileux.

#### 2.2.5.4 *Cultures appropriées :*

Les caractéristiques du sol (texture, structure, PH, teneur en matières organiques....) déterminent les cultures appropriées pour ce type du sol. Dans le cas de l'argile, les cultures appropriées sont :

**Arbustes :** Aubépine, Aucuba, Groseillier à fleurs, Lilas, Mahonia.

**Arbres :** Bouleau, Catalpa, Peuplier, Pommier d'ornement.

**Légumes :** Aubergine, Betterave, Chou, Courge, Haricot, Laitue, Melon.

**Fruitiers :** Cassissier, Framboisier, Groseillier, Kaki, Poirier, Prunier.

#### 2.2.6 *Matières organiques :*

##### 2.2.6.1 *Définition :*

La matière organique est fabriquée par la plante à partir d'eau et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) en exploitant l'énergie solaire : C'est le phénomène de la photosynthèse. Elle puise dans le sol les éléments minéraux et l'eau nécessaires à sa croissance.

On distingue deux grandes catégories de matières organiques : celles présentes dans tous les êtres vivants et celles qui s'accumulent à la surface du sol ou au fond des océans suite à la décomposition de ces êtres vivants.

Une fois décomposée et transformée en humus, la matière organique continue de jouer un rôle très important, car elle constitue un stock de carbone et une réserve d'éléments minéraux utiles pour les plantes et les micro-organismes. Elle assure également la stabilité de la structure du sol et permet de limiter les phénomènes d'érosion. Enfin, elle permet d'augmenter la réserve en eau du sol et d'éviter le lessivage des engrais et pesticides.

##### 2.2.6.2 *Les rôles de la matière organique dans le sol :*

###### 2.2.6.2.1 La protection du sol :

L'humus s'associe aux argiles, afin de former ce que l'on appelle le complexe argilo-humique. Ce dernier est à l'origine de la structure dite « grumeleuse » du sol. Celle-ci, est très favorable à la croissance des racines des plantes.

Non seulement l'humus permet la formation des agrégats, mais en plus il les stabilise, en formant autour d'eux une couche protectrice contre l'effet dégradant de l'eau de pluie.

L'humus, en favorisant la formation de la structure grumeleuse, permet une meilleure infiltration et rétention de l'eau dans le sol. De ce fait, elle ne ruisselle pas et donc n'érode pas le sol.



**Figure 2 : Érosion dans un champ**

#### 2.2.6.2.2 L'activité biologique et la fertilité du sol

L'apport de matières organiques sur le sol provoque l'activation des micro-organismes.

La décomposition de la matière organique fraîche se produit en deux phases. Elle aboutit, d'une part, à la libération d'éléments minéraux (minéralisation primaire) et, d'autre part, à la formation d'humus. Au cours du temps, l'humus se décomposera à son tour pour libérer, lui aussi, des éléments minéraux. On appelle cela la minéralisation secondaire ou minéralisation de l'humus. Les éléments minéraux serviront à la croissance des plantes.

L'humus, des charges électriques négatives, ce qui lui confère la faculté de retenir des éléments minéraux pour autant que ceux-ci portent des charges électriques positives ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , ..) et de les mettre facilement à disposition des plantes. Ces éléments minéraux peuvent par exemple provenir des engrais que l'agriculteur apporte au sol.

L'humus donne au sol une couleur foncée qui favorise son réchauffement. Cela est très important, car accroître la température d'un champ de  $1^\circ\text{C}$  sous nos climats peut accroître la production de 10%.

#### 2.2.6.2.3 Le stockage du carbone dans le sol :

Les matières organiques du sol constituent un stock de carbone qui permet de limiter l'effet de serre et le réchauffement climatique.

### 2.3 Conclusion :

Le monitoring en agriculture permet de surveiller l'état de la végétation en contrôlant plusieurs paramètres comme : l'eau, l'indice de surface foliaire, les éléments nutritifs, chlorophylle...etc. Le suivi permet de détecter les carences et les problèmes et enfin les résoudre avant qu'il soit trop tard et cela s'effectue grâce à la télédétection.

**Chapitre 3**  
**Téledétection agricole**

### 3 Télédétection agricole :

#### 3.1 Introduction :

La planète Terre a connu des changements radicaux au cours de ces dernières années tels que le changement climatique et comme conséquence la végétation est affectée par ce dernier et pour cela, il est primordial de suivre la végétation.

La télédétection est une technique qui utilise des outils spéciaux sans contact physique dans le but d'obtenir des informations sur le but recherché. Les données de télédétection ont des propriétés très intéressantes telles que multispectralité, la multitemporalité, bonne résolution spatiale et vision radiométrique variée, large et phénomènes agricoles tels que la surface et les modèles de temps et les zones de culture.

La surveillance agricole est une nécessité pour le suivi de l'état de la zone d'étude et détecter avec précision l'emplacement des zones qui souffrent des problèmes (manque d'eau, d'azote, maladies des plantes...) et donc agir pour résoudre ces problèmes avant qu'ils ne s'aggravent et n'affectent la quantité et la qualité du rendement et pour éviter une fertilisation excessive.

#### 3.2 Le recueil d'informations :

Trois outils sont majoritairement utilisés de nos jours, les satellites, les avions, et les drones. Ce sont des moyens très différents qui ont chacun leurs lots d'avantages et d'inconvénients.

Mais quel est le choix le plus avantageux à faire entre le drone et le satellite pour obtenir toutes ces données ?



**Figure 1 : Exemple d'un drone (gauche), d'un ULM (centre) et d'un satellite (droite)**

- Premièrement, les satellites n'offrent pas la possibilité pour les agriculteurs d'être achetés (coût excessif). Ils doivent donc louer des services plus ou moins onéreux en fonction de la résolution demandée. A titre d'exemple, l'acquisition des données avec une résolution de 30m est gratuite, alors que celle avec une précision de 50cm a un prix élevé pour chaque km<sup>2</sup>. Il faut en plus de ces chiffres ajouter les prix d'analyses des données qui sont à prendre en compte au km<sup>2</sup>. Les avantages du satellite sont sa capacité à couvrir un grand terrain en très peu de temps (300km en une-journée) et son coût inférieur aux autres techniques. Au contraire, ses inconvénients sont nombreux. On peut notamment citer sa faible résolution, ses capteurs embarqués qui sont souvent



vieux car difficilement remplaçables, sa dépendance aux conditions météorologiques (nébulosité) ou son faible taux de passage au-dessus de la zone visée.

- Ensuite, nous avons la possibilité d'utiliser des drones. Ils sont accessibles dès l'achat par l'agriculteur, même s'il faudra ensuite compter les prix d'analyse. Ce chiffre correspond également au coût de prestation d'un drone agricole pour 1 km<sup>2</sup> (analyse comprise). Il est donc financièrement plus intéressant d'acquérir son propre drone si l'on veut souvent utiliser l'agriculture de précision. L'inconvénient du drone est donc son coût élevé par rapport au satellite, mais il compense cette dépense avec une précision centimétrique au niveau de la parcelle. Il est également immunisé contre les temps nuageux (vu qu'il vole en dessous) et il permet de changer ses capteurs régulièrement. Enfin, il offre une possibilité de restitution rapide des cartes de préconisations ce qui est très bénéfique en cas de dégât sur les cultures (gel ou animaux par exemple). Cependant, l'autonomie des drones est faible (environ 1h30) et il ne permet donc pas de couvrir de grandes distances. De même, certains endroits sont totalement interdits au survol de drone.
- On en arrive à la troisième technique qui se présente comme un parfait intermédiaire entre les deux précédentes. En effet, L'ULM « planeur ultraléger motorisé » permet de couvrir une surface comparable à celle du satellite en une journée tout en ayant la même précision qu'un drone classique. Mais son prix horaire élevé le rend uniquement intéressant pour les grandes surfaces à analyser. Cependant, en Amérique, de nouvelles entreprises commencent à diminuer ces coûts par la planification de la mission pour desservir plusieurs clients en un seul vol.

En conclusion, il faut privilégier les satellites ou les avions si l'on veut obtenir des cartographies de zones étendues, mais si l'on veut uniquement étudier une petite surface, il est préférable d'utiliser un drone. En effet, une étude a démontré que les drones offraient l'option la plus économique pour les cartographies de moins de 5 hectares. Dans le futur, le coût et la résolution de l'imagerie satellitaire va continuer à s'améliorer, comme l'endurance, la robustesse et les capacités des drones. C'est donc l'imagerie par avion qui risque de voir sa position intermédiaire de plus en plus menacée.

### 3.3 L'importance de la télédétection :

La télédétection offre une méthode sûre et efficace de collecte d'informations dans le but de cartographier le type et de chiffrer la superficie des cultures. En plus d'offrir une vue synoptique, la télédétection peut fournir de l'information sur la structure et la santé de la végétation. La réflectance spectrale d'un champ varie selon le stade phénologique (stade de croissance), le type de plantes et leur état de santé. Les micro-ondes sont sensibles à l'alignement, la structure et la quantité d'eau présente dans les plantes et dans le sol et peuvent fournir de l'information complémentaire aux données optiques. L'intégration de ces deux types de données augmente l'information disponible pour distinguer la signature spectrale de chaque classe et permet donc une classification plus juste. Les résultats de l'interprétation des données de télédétection peuvent être intégrés dans un SIG et dans un système de gestion des cultures, et peuvent aussi être combinés à des données auxiliaires pour fournir de l'information sur les droits de propriété, les pratiques de gestion,.... Néanmoins, de nombreuses études utilisent la télédétection pour la cartographie et le suivi des systèmes agricoles associées à une échelle plus fine à l'échelle régionale ou globale et le suivi des différents phénomènes (déforestation, urbanisation, érosion). Dans ce cas, les images sont de résolution spatiale moyenne à basse, offrant une haute répétitivité temporelle, et donc la possibilité d'un suivi précis dans le temps.

## **Remarque :**

Dans ce présent projet, on a utilisé des images satellitaires pour plusieurs raisons :

- La zone d'étude est grande.
- La non disponibilité des images obtenues par des drones ou des ULM de notre zone d'étude.
- La résolution obtenue est bonne.

Pour toutes ces raisons, on ne s'intéressera seulement qu'aux prétraitements et aux analyses que l'on doit effectuer aux images satellitaires.

### **3.4 Le prétraitement des images satellitaires :**

Les images satellitaires doivent subir des corrections (radiométrique, atmosphérique) afin d'améliorer leur qualité et d'avoir des informations qui reflètent correctement l'état de surface de la zone d'étude.

#### **3.4.1 Les étapes de la correction des images satellitaires:**

- 1- Convertir les DN en radiance en fonction des facteurs de rééchantillonnage fournis dans le fichier de métadonnées.
- 2- Convertir la luminance en réflectance au sommet de l'atmosphère, requiert des informations supplémentaires: distance Terre-Soleil, angle zénith solaire, éclairement énergétique exo-atmosphérique.
- 3- Appliquer une correction atmosphérique, nécessite une connaissance des conditions atmosphériques au moment de l'acquisition de l'image.

##### **3.4.1.1 *Correction radiométrique:***

Une correction radiométrique est effectuée pour réduire ou corriger les erreurs dans les nombres numériques d'images. Le processus améliore l'interprétabilité et la qualité des données de télédétection. L'étalonnage et la correction radiométriques sont particulièrement importants lors de la comparaison d'ensembles de données sur plusieurs périodes. L'énergie que les capteurs à bord d'aéronefs ou de satellites enregistrent peut différer de l'énergie réelle émise ou réfléchi par une surface au sol. Cela est dû à l'azimut et à l'altitude du soleil, ainsi qu'aux conditions atmosphériques pouvant influencer sur l'énergie observée. Par conséquent, afin d'obtenir l'irradiance ou la réflectance réelle du sol, il faut corriger les erreurs radiométriques.

##### **3.4.1.2 *Correction atmosphérique:***

La correction atmosphérique est le processus qui consiste à éliminer les effets de l'atmosphère afin de produire des valeurs de réflectance de surface. La correction atmosphérique peut améliorer considérablement l'interprétabilité et l'utilisation d'une image. Idéalement, ce processus nécessite une connaissance des conditions atmosphériques telles que la quantité de vapeur d'eau et des propriétés de l'aérosol au moment de l'acquisition de l'image. Parfois, ces données peuvent être collectées par des instruments de terrain qui mesurent les gaz atmosphériques et les aérosols, mais cela prend souvent beaucoup de temps et d'argent. De nombreux logiciels incluent des modules spéciaux de correction atmosphérique qui utilisent des modèles de transfert de rayonnement atmosphérique pour produire une estimation de la réflectance vraie de la surface.

#### 3.4.1.2.1 Méthode de soustraction d'objets sombres:

Cette méthode est utilisée lorsqu'il n'y a pas de données disponibles sur les conditions atmosphériques et les propriétés de l'aérosol au moment de l'acquisition de l'image. L'hypothèse de base de cette méthode est que, dans l'image, certains pixels sont complètement dans l'ombre et que leurs rayonnements reçus par le satellite sont entièrement dus à la diffusion atmosphérique (radiance du trajet). La soustraction d'objets sombres recherche dans chaque bande la valeur de pixel la plus sombre. La suppression de la diffusion est effectuée en soustrayant cette valeur de chaque pixel de la bande. La précision de ces techniques est généralement inférieure à celle des corrections physiques, mais elle est utile lorsqu'aucune mesure atmosphérique n'est disponible.

Le choix de cette méthode de correction atmosphérique n'est pas aléatoire, mais basé sur le fait qu'elle a prouvé son efficacité en comparant les mesures de réflectance au sol dérivées du spectroradiomètre utilisées comme référence et celles obtenues par la méthode de soustraction d'objets sombres. Voici quelques illustrations :

- Hadjimitsis et al. (2004) ont évalué l'efficacité sur les images Landsat TM de réservoirs de traitement de l'eau, d'algorithmes de correction atmosphérique basés sur des images et d'autres algorithmes utilisant la modélisation atmosphérique. Ils ont constaté que l'algorithme DP était le plus efficace dans les bandes bleu, vert et rouge de Landsat TM (respectivement 1, 2 et 3).
- Chrysoulakis et al. (2010) ont comparé plusieurs méthodes de correction atmosphérique pour la région de Crète et ont étudié les effets de la correction atmosphérique sur la classification de la couverture terrestre et la détection des changements. Quatre méthodes de correction atmosphérique ont été appliquées à une série chronologique d'images ASTER et comparées. La ligne de base de cette comparaison est la distribution spatiale de la réflectance de surface. La radiance émise et la température de luminosité calculées par ASTER Higher Level Products ont été utilisées. La comparaison a montré que la méthode DP fournissait des résultats satisfaisants pour les zones spectrales visibles, proche infrarouges et infrarouges à ondes courtes; par conséquent, il peut être utilisé dans des applications locales liées à la couverture terrestre et à la végétation.

Dans ce projet, à cause de la non disponibilité des données sur les conditions atmosphériques et les propriétés de l'aérosol au moment de l'acquisition de l'image, on va utiliser QGIS pour effectuer la correction atmosphérique des images satellitaires par la méthode DOS 1.

### 3.5 QGIS :

#### 3.5.1 Description :

Quantum GIS (QGIS) est un système d'information géographique (SIG) aisé à prendre en main. Il peut être utilisé sous Linux, Unix, Mac OS X, et Windows. QGIS supporte les formats vectoriels, rasters et de bases de données. QGIS est publié sous la GNU Public License. Quantum GIS dispose d'une liste sans cesse accrue de fonctionnalités via un puissant système d'extensions. Il permet de visualiser, gérer, éditer, analyser les données et composer des cartes imprimables.

### 3.5.2 Fonctionnalités :

#### 3.5.2.1 *Visualiser des données :*

Il permet d'afficher et superposer des couches de données rasters et vecteurs (en 2D et 3D) dans différents formats et projections sans avoir à faire de conversion dans un format commun.

#### 3.5.2.2 *Parcourir les données et créer des cartes :*

Il permet de créer des cartes et les parcourir de manière interactive avec une interface intuitive. Les outils disponibles dans l'interface sont :

- ❖ l'Explorateur QGIS.
- ❖ La reprojection à la volée.
- ❖ Le Gestionnaire de bases de données.
- ❖ La Mise en page de cartes.
- ❖ Le panneau d'aperçu.
- ❖ Les signets géospatiaux.
- ❖ Les outils d'annotation.
- ❖ L'identification et la sélection des entités.
- ❖ L'affichage, l'édition et la recherche de données attributaires.
- ❖ L'étiquetage se basant sur les valeurs des données attributaires.
- ❖ Les outils de style définis par les données vecteur et raster.
- ❖ La création d'atlas avec des couches de carroyage.
- ❖ La flèche indiquant le nord, la barre d'échelle et l'étiquette de droits d'auteur.
- ❖ La gestion de la sauvegarde et de la restauration des projets.
- ❖ Le traitement des données.

#### 3.5.2.3 *Analyser des données :*

Il permet de réaliser des analyses de données spatiales sur des bases de données spatiales ou tout autre format géré par OGR. QGIS propose pour le moment des analyses vectorielles, des outils de rééchantillonnage, de traitements spatiaux, et de gestion des géométries et des bases de données.














## 3.6 Classification semi-automatique en utilisant QGIS:

Bien que les données obtenues à partir de Earth Explorer soient très bonnes, il reste encore quelques corrections à apporter afin d'éliminer le voile et la dispersion qui se produisent lorsque des images sont prises dans l'atmosphère terrestre. Pour ce faire, nous utiliserons le plugin de classification semi-automatique, ou SCP, au sein de QGIS.

Il suffit de naviguer jusqu'au menu des plugins en haut de l'utilisateur et de cliquer sur Gérer et installer les plugins. Dans la barre de recherche, il faut commencer à taper SEMI et le plugin de classification semi-automatique apparaîtra. Puis l'on clique sur le bouton Installer un plugin en bas à droite pour commencer à utiliser le plugin.


### 3.6.1 SCP menu :

Le menu SCP permet de sélectionner les fonctions principales de la fenêtre d'interface principale de la fenêtre Spectral, Signature Plot et le nuage de points.

-  Jeu de bandes ;
-  Télécharger des images ;
-  outils ;
-  Prétraitement;
-  Post-traitement ;
-  Bande calculée ;
-  Tracé de signature spectrale ;
-  Nuage de points ;
-  Lot ;
-  Paramètres ;
-  Manuel de l'utilisateur: ouvrez le manuel de l'utilisateur en ligne dans un navigateur Web;
-  Aide en ligne: ouvre l'aide en ligne dans un navigateur Web; aussi, un groupe Facebook et une communauté Google+ sont disponibles pour partager des informations et demander de l'aide sur SCP;
-  Afficher le plug-in: affiche toutes les barres d'outils SCP et le dock s'il était précédemment masqué;

Dans cette étude, on s'intéresse aux prétraitements qu'on doit effectuer sur les images satellitaires « Correction radiométrique et atmosphérique ».




### 3.6.2 Prétraitement :

L'onglet  Prétraitement fournit plusieurs outils de manipulation de données utiles avant le processus de classification.

Cet onglet permet de convertir les images Landsat 1, 2 et 3 MSS et Landsat 4, 5, 7 et 8 de DN (c-à-d Numéros numériques) en mesure physique de la réflectance du haut de l'atmosphère (TOA), et pour Sentinel 2 la conversion des images en une mesure physique de la réflectance du haut de l'atmosphère ou l'application d'une correction atmosphérique simple à l'aide de la méthode DOS1 (Dark Object Subtraction 1) et Pan-sharpening qui est également disponible.

Une fois l'entrée sélectionnée, les bandes disponibles sont répertoriées dans le tableau de métadonnées.

#### 3.6.2.1 Conversion pour Landsat et Sentinel-2 :



- Répertoire contenant les bandes  : ouvre un répertoire contenant les bandes; les noms des bandes doivent se terminer par le numéro correspondant; si le fichier de métadonnées est inclus dans ce répertoire, les métadonnées sont automatiquement renseignées;
- Sélectionner le fichier MTL   : si le fichier de métadonnées n'est pas inclus dans le répertoire contenant les bandes Landsat, sélectionnez le chemin du fichier de métadonnées afin de remplir les métadonnées automatiquement.

Pour Sentinel 2, le fichier de métadonnées est un fichier.xml dont le nom contient MTD\_MSIL1C;

- Appliquer la correction atmosphérique DOS1: si cette case est cochée, la correction DOS1 est appliquée à toutes les bandes (bandes thermiques exclues);
- Utiliser la valeur NoData (l'image présente une bordure noire): si cette case est cochée, les pixels ayant la valeur NoData ne sont pas comptés lors de la conversion et du calcul DOS1 de  $DN_{min}$ ; c'est utile quand l'image a une bordure noire (généralement valeur pixel = 0);
- Effectuer un pan-sharpening: si cette case est cochée, une transformation de Brovey est appliquée pour le pan-sharpening des bandes;

### Métadonnées:

Toutes les bandes trouvées dans le répertoire contenant les bandes sont répertoriées dans le tableau Métadonnées. Si le Landsat fichier de métadonnées (un fichier.txt ou .met avec le suffixe MTL) et le Sentinel-2 fichier de métadonnées (un fichier.xml dont le nom contient MTD\_MSIL1C) sont fournis, les métadonnées sont automatiquement remplies.

- Satellite  : nom du satellite;
- Date  : date d'acquisition;
- élévation du soleil  ;
- Distance Soleil Terre  : distance Soleil Terre en unités astronomiques (calculée automatiquement si la Date est remplie);
-  : supprimer les bandes en surbrillance du tableau Métadonnées;
-  Métadonnées: table contenant les champs suivants;

Pour Landsat 8 :

- Bande: nom de la bande;
- RADIANCE\_MULT: facteur de redimensionnement multiplicatif;
- RADIANCE\_ADD: facteur de redimensionnement additif;
- REFLECTANCE\_MULT: facteur de redimensionnement multiplicatif;
- REFLECTANCE\_ADD: facteur de redimensionnement additif;
- RADIANCE\_MAXIMUM: rayonnement maximum;
- REFLECTANCE\_MAXIMUM: réflectance maximum;
- K1\_CONSTANT: constante de conversion thermique;
- K2\_CONSTANT: constante de conversion thermique;
- LMAX: radiance spectrale mise à l'échelle selon QCALMAX;
- LMIN: radiance spectrale mise à l'échelle en QCALMIN;
- QCALMAX: valeur de pixel calibrée minimum quantifiée;
- QCALMIN: valeur de pixel calibrée maximum quantifiée;

Pour Sentinel 2 :

- Bande: nom de la bande;
- valeur de quantification: valeur à convertir en facteur de réflexion TOA;
- irradiance solaire: irradiance solaire de bande;

Et enfin l'icône « Lancer » :



: sélectionnez un répertoire de sortie et démarrez le processus de conversion; uniquement les bandes répertoriées dans le tableau Métadonnées sont convertis; Les bandes converties sont enregistrées dans le répertoire de sortie avec le préfixe RT\_ et automatiquement chargé dans QGIS;

### 3.6.2.2 Conversion d'image en réflectance :

#### 3.6.2.2.1 Rayonnement à l'ouverture du capteur :

La radiance est le « flux d'énergie (principalement l'énergie irradiante ou incidente) par angle solide, laissant une unité de surface dans une direction donnée», «La radiance est ce qui est mesuré au niveau du capteur et dépend un peu du facteur de réflexion».

Les images telles que Landsat ou Sentinel-2 sont composées de plusieurs bandes et d'un fichier de métadonnées contenant les informations nécessaires à la conversion en facteur de réflexion.

Les images Landsat sont fournies en radiance, mises à l'échelle avant la sortie. Pour les images Landsat, le rayonnement spectral à l'ouverture du capteur ( $L_\lambda$ , mesuré en [watts / (mètre carré \* ster \*  $\mu m$ )] est donné par :

([https://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)):

$$L_\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L \quad \text{----- (1)}$$

Où:

- $M_L$  = facteur de redimensionnement multiplicatif spécifique à la bande à partir de métadonnées Landsat (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)
- $A_L$  = facteur de redimensionnement additif spécifique à la bande à partir de métadonnées Landsat (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)
- $Q_{cal}$  = valeurs de pixel du produit standard quantifiées et calibrées (DN).

#### 3.6.2.2.2 Réflectance du haut de l'atmosphère (TOA) :

Les images en luminance énergétique peuvent être converties en réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA) (réflectance combinée de surface et atmosphérique) afin de réduire la variabilité entre les scènes grâce à une normalisation de l'éclairement énergétique du soleil. Cette réflectance TOA ( $\rho_p$ ), qui correspond au rapport sans unité de l'énergie électrique réfléchi par rapport à l'énergie totale, est calculée par:

$$\rho_p = (\pi * L_\lambda * d^2) / (ESUN_\lambda * \cos\theta_s) \quad \text{----- (2)}$$

où:

- $L_\lambda$  = radiance spectrale à l'ouverture du capteur.

$d$  = distance Terre-Soleil en unités astronomiques (fourni avec le fichier de métadonnées Landsat 8, et un fichier Excel est disponible à l'adresse [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/excel\\_docs/d.xls](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/excel_docs/d.xls))

- $ESUN_\lambda$  = Irradiances moyennes solaires exo-atmosphériques
- $\theta_s$  = Angle de zénith solaire en degrés, ce qui correspond à  $= 90^\circ - \theta_e$  où  $\theta_e$  est l'élévation du soleil.

Il convient de noter que les images Landsat 8 sont fournies avec des facteurs de rééchantillonnage spécifiques à chaque bande qui permettent la conversion directe de la réflectance du DN en TOA.

Les images Sentinel-2 sont déjà fournies dans la réflectance TOA mise à l'échelle, qui peut être convertie en réflectance TOA avec un calcul simple à l'aide de la valeur de quantification fournie dans les métadonnées.

### 3.6.2.2.3 Réflectance de surface :

#### 3.6.2.2.3.1 Définition :

Les effets de l'atmosphère (c'est-à-dire une perturbation de la réflectance qui varie avec la longueur d'onde) doivent être pris en compte afin de mesurer la réflectance au sol.

Comme décrit par Moran et al. (1992), la réflectance de la surface du sol ( $\rho$ ) est:

$$\rho = [\pi * (L_\lambda - L_p) * 2] / [T_v * ((ESUN_\lambda * \cos\theta_s * T_z) + E_{down})] \quad (3)$$

Où:

- $L_p$  est le chemin de radiance
- $T_v$  est le facteur de transmission atmosphérique dans la direction d'observation
- $T_z$  est le coefficient de transmission atmosphérique dans la direction de l'éclairage
- $E_{down}$  est l'irradiance diffuse en aval.

Par conséquent, nous avons besoin de plusieurs mesures atmosphériques pour calculer (corrections physiques).

#### 3.6.2.2.3.2 Correction DOS 1 :

La soustraction d'objets noirs (DOS) est une famille de corrections atmosphériques basées sur des images. Chavez (1996) explique que «l'hypothèse de base est que dans l'image, certains pixels sont complètement ombrés et que leurs rayonnements reçus par le satellite sont dus à la diffusion atmosphérique (radiance du trajet). Cette hypothèse s'ajoute au fait que très peu de cibles à la surface de la Terre sont en noir absolu, de sorte qu'une réflectance minimale supposée de 1% est mieux que zéro pour cent ". Il convient de souligner que la précision des techniques basées sur l'image est généralement inférieure à celle des corrections physiques, mais elles sont très utiles lorsqu'aucune mesure atmosphérique n'est disponible, car elles peuvent améliorer l'estimation de la réflectance de la surface du sol. Le rayonnement du trajet est donné par :

$$L_p = L_{min} - L_{DO1\%} \quad (4)$$

où:

- $L_{min}$  = radiance qui correspond à une valeur de comptage numérique pour laquelle la somme de tous les pixels dont le nombre de comptages numériques est inférieur ou égal à cette valeur est égale à 0,01% de tous les pixels de l'image considérée, donc la luminance énergétique obtenue avec cette valeur de comptage numérique  $DN_{min}$
- $L_{DO1\%}$  = radiance de Dark Object, supposée avoir une valeur de réflectance de 0,01

En particulier pour les images Landsat:

$$L_{min} = M_L * DN_{min} + A_L \quad (5)$$

Les images de Sentinel-2 sont converties en radiance avant le calcul DOS1.

La luminance de Dark Object est donnée par (Sobrino, et al. 2004):

$$L_{DO1\%} = 0,01 * [(ESUN_\lambda * \cos\theta_s * T_z) + E_{down}] * T_v / (\pi * d^2) \quad (6)$$

Le rayonnement de la voie est donc :

$$L_p = M_L * DN_{min} + A_L - 0,01 * [(ESUN_\lambda * \cos\theta_s * T_z) + E_{down}] * T_v / (\pi * d^2) \quad (7)$$

Il existe plusieurs techniques DOS (par exemple, DOS1, DOS2, DOS3, DOS4), basées sur



des hypothèses différentes concernant,  $T_z$ ,  $T_v$ , et  $E_{down}$ . La technique la plus simple est la DOS1, où les hypothèses suivantes sont formulées :

- $T_v = 1$
- $T_z = 1$
- $E_{down} = 0$

Le rayonnement de la voie est donc:

$$L_p = M_L * DN_{min} + A_L - 0.01 * ESUN_\lambda * \cos\theta_s / (\pi * d^2) \text{ ----- (8)}$$

Et la réflectance de la surface terrestre résultante est donnée par:

$$\rho = [\pi * (L_\lambda - L_p) * d^2] / (ESUN_\lambda * \cos\theta_s) \text{ ----- (9)}$$

Pour Landsat 8, peut être calculé comme suit (à partir de <http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/i.landsat.toar.html>):

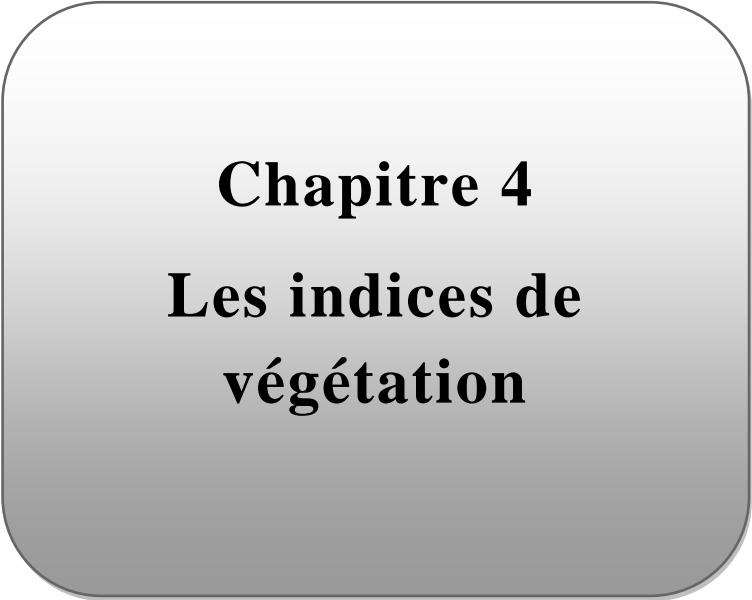
$$ESUN = (\pi * d^2) * RADIANCE\_MAXIMUM / REFLECTANCE\_MAXIMUM \text{ ---- (10)}$$

où : RADIANCE\_MAXIMUM et REFLECTANCE\_MAXIMUM sont fournis par des métadonnées d'image.

Les valeurs ESUN [ $W / (m^2 * \mu m)$ ] du capteur Sentinel-2 (fournies dans les métadonnées de l'image).

### 3.7 Conclusion :

La télédétection agricole permet d'obtenir des informations sur la végétation sans contact physique. Les images satellitaires sont l'une des sources d'informations mais elles nécessitent des corrections avant finalement d'utiliser les indices de végétation pour extraire des informations cohérentes qui reflètent correctement l'état de surface de la zone d'étude.



**Chapitre 4**  
**Les indices de**  
**végétation**

## 4 Les indices de végétation :

### 4.1 Introduction :

La connaissance des propriétés de la plante pendant la saison de croissance pour le contrôle des maladies, les performances attendues et la gestion de l'exploitation afin d'optimiser les performances et d'éviter une fertilisation excessive et la souffrance de la végétation d'un stress hydrique sont très importantes. En fait, la réponse d'une région agricole aux rayonnements solaires dépend de son état sanitaire, hydrique et plusieurs autres paramètres de la plante. Et donc l'une des méthodes pour profiter de cette dépendance est d'extraire le maximum d'informations par l'utilisation d'un indice de végétation. Mais qu'est-ce qu'un indice de végétation ?

### 4.2 Définition de l'indice de végétation :

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multi spectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement, basés sur le caractère multi spectral des données satellitaires pour décrire l'état d'un phénomène. Les indices de végétation sont très utilisés pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif et l'humidité du carburant aux fins de validation etc.

L'une des méthodes courantes d'utilisation de ces indices est la comparaison du même objet sur plusieurs images au fil du temps. Par exemple, il peut y avoir plusieurs images d'un champ agricole prises chaque semaine depuis la plantation et tout au long de la saison de croissance. L'indice de végétation serait calculé pour chaque image. Lorsque l'on analyse ces indices de végétation hebdomadaires, il est attendu à voir un éclaircissement au cours de la saison de croissance. Ensuite, lorsque la sénescence commence à l'automne, l'indice diminue jusqu'à ce que la plante soit récoltée ou que les feuilles soient mortes en fin saison. L'effet normalisant des indices rend cette comparaison pratique. En comparant plusieurs champs dans une région, on peut identifier ceux qui prospèrent à ceux qui rencontrent des difficultés. Ce type d'analyse peut également être utilisé pour identifier les champs ayant subi des dégâts de tempête.

### 4.3 Le choix des bandes des indices de végétation :

Le choix des bandes des indices de végétation n'est pas aléatoire mais basé sur les caractéristiques des bandes et leurs réponses avec l'état de végétation. Les caractéristiques des bandes spectrales sont décrites comme suit:

- ❖ **Bleu** : 450–515,520 nm, est utilisé pour l'imagerie de l'atmosphère et des eaux profondes et peut atteindre des profondeurs allant jusqu'à 50 m en eau claire.
- ❖ **Vert** : 515, 520–590, 600 nm, est utilisé pour la visualisation de végétation et de structures en eau profonde, jusqu'à 30 m en eau claire.
- ❖ **Rouge** : 600,630–680,690 nm, est utilisé pour la numérisation d'objets fabriqués par l'homme, dans des eaux d'une profondeur maximale de 9 m, dans le sol et la végétation où la réflectance dans le rouge diminue (pic d'absorption de la chlorophylle).

- ❖ **Le proche infrarouge (PIR) : 750–900 nm**, est principalement utilisé pour la visualisation de végétation sachant que les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de la végétation.
- ❖ **La bande de bord rouge (0.705-0.745µm)**:  
La bande de bord rouge se situe entre les bandes infrarouge proche et rouge. Avec une réflectivité élevée de la santé et de la vitalité des plantes, la réponse de la végétation du bord rouge est souvent plus importante à la fois pour le contenu en chlorophylle et pour la structure de la feuille et permet même faire la distinction entre des cultures saines et des cultures affectées par une maladie.
- ❖ **Infrarouge à ondes courtes - SWIR (1,57-2,35 µm) :**  
L'infrarouge à ondes courtes (SWIR) peut aider à distinguer les sols secs des sols humides. Il est également utilisé dans la signature spectrale pour la géologie et la classification des sols. SWIR est également connu pour sa capacité à pénétrer dans les nuages minces, et même à fumer et à brumer mieux que les bandes visibles.
- ❖ **Panchromatique (0,50-0,68µm)**:  
Les bandes panchromatiques collectent simultanément toutes les lumières réfléchies visibles dans un seul canal. Comme elle voit plus de lumière en même temps, la résolution spatiale est la plus nette contrairement à la collecte séparée des canaux rouge, bleu et vert.  
Elle permet d'améliorer la netteté des images en combinant les informations de couleur avec la bande panchromatique.

#### 4.4 Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et dans le proche infrarouge :

Si l'on observe le diagramme de dispersion ou scattérogramme des bandes spectrales rouge et proche infrarouge, on constate généralement une répartition des valeurs de réflectance en forme de chapeau (figure ci-dessous). La base du chapeau répartie le long de la bissectrice représente la droite des sols, dépourvue de végétation. Les variations de réflectance le long de la droite des sols traduisent le caractère sec ou humide des sols. Plus on s'approche de l'origine « faibles valeurs de réflectance » dans le rouge et le proche infrarouge), plus les sols sont humides et à contrario, plus on est loin de l'origine, plus les sols sont secs.

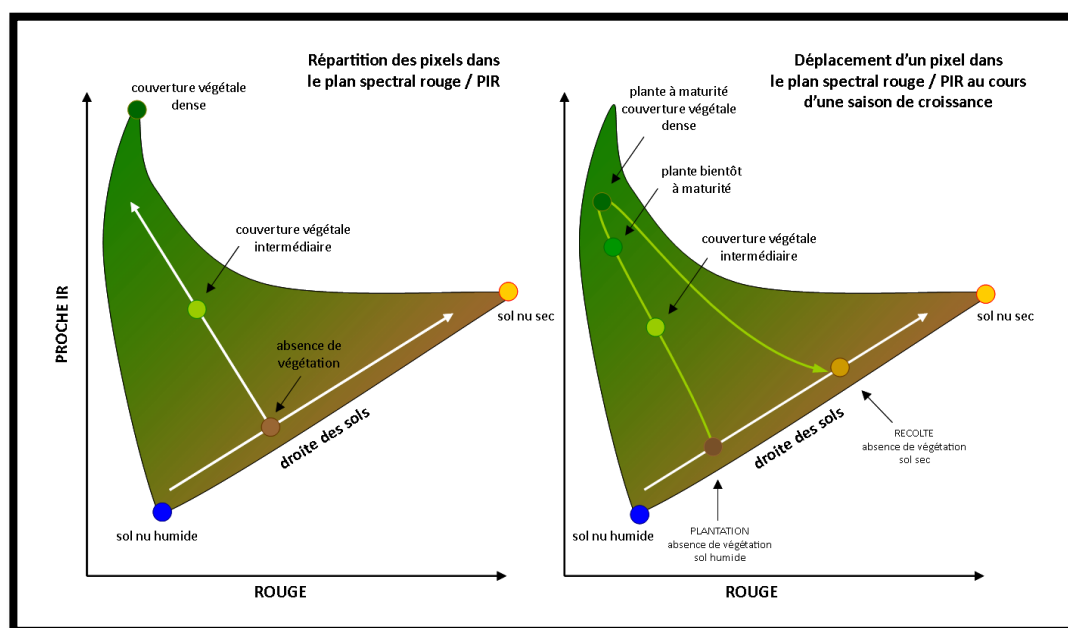


Figure 1 : Le diagramme de dispersion ou des bandes spectrales rouge et proche infrarouge

Plus la couverture végétale est dense, plus les valeurs de réflectance augmentent dans le PIR et plus elles diminuent dans la bande rouge. La droite des sols, dépourvue de végétation présente des réflectances qui varient en fonction de leur teneur en eau.

#### 4.5 Les principaux indices de végétation :

Nous distinguerons les indices de végétation en neufs grandes catégories :

- Les indices intrinsèques.
- Les indices basés sur la droite des sols.
- Les indices corrigeant l'effet atmosphérique, tels que le ARVI et le GEMI.
- Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère.
- Les indices prenant en compte la température de surface.
- Les indices hydriques.
- Les indices de paysage.
- Les indices géologiques.

##### 4.5.1 Les indices simples :

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge. Ces indices ne prennent en compte aucun facteur externe autre que la réflectance spectrale mesurée au capteur.

##### 4.5.1.1 L'indice différentiel de végétation DVI :

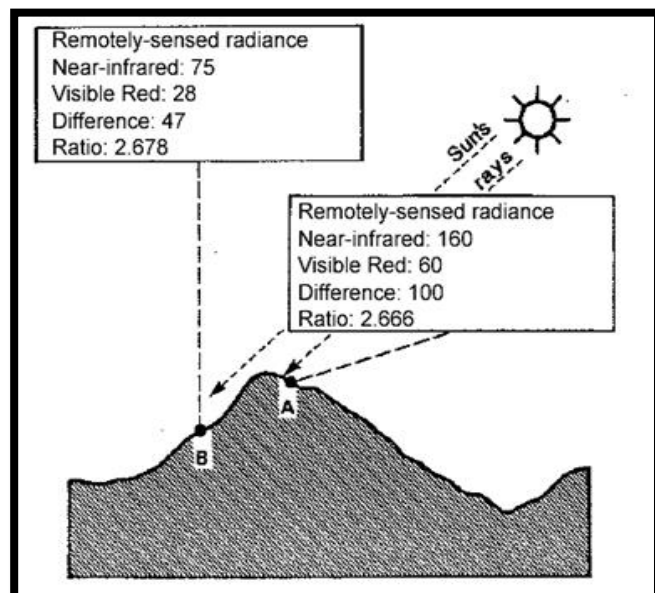
Parmi les indices les plus élémentaires et les plus anciens, on trouve **l'indice de végétation brut, ou indice différentiel de végétation** (DVI en anglais) qui est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge

$$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R \text{ ----- (11)}$$

Où  $\rho_{PIR}$  : Réflectance dans la bande rouge et  $\rho_R$  : Réflectance dans la bande proche infrarouge

La figure 2 représente deux points de couverture végétale identique mais ne recevant pas la même quantité d'éclairage direct par unité de surface en raison de l'orientation des versants par rapport au rayonnement direct solaire. L'éclairage en B est égal à 50% de l'éclairage en A. La différence entre les comptes numériques de PIR et R n'est pas identique entre les deux points malgré que les 2 points soient de couverture végétale identique. Le DVI ne nous donne pas une bonne indication de l'état de la végétation car il est extrêmement influencé par l'éclairage différentiel et donc par les variations topographiques. Il en résulte que le DVI est très rarement utilisé, en comparaison aux autres indices plus performants.

**Figure 2 : Comparaison du rapport et de la différence entre bandes pour deux points illuminés différemment**



#### 4.5.1.2 L'indice de végétation par différence normalisé :

L'indice le plus utilisé et le plus connu est l'**indice de végétation par différence normalisé** (NDVI en anglais) .Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR^-} - \rho_R}{\rho_{PIR^-} + \rho_R} \text{ ----- (12)}$$

$$NDVI = \frac{SR-1}{SR+1} = \frac{\tan(\alpha) - 1}{\tan(\alpha) + 1} = \tan(\alpha - 45^\circ) \text{ ----- (13)}$$

La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quelque soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement.

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondent à une réflectance dans le rouge supérieure à celle du proche infrarouge et représentent des surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 - les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

##### 4.5.1.2.1 Points forts de NDVI :

- Cet indice est utilisé pour évaluer l'état nutritionnel azote d'un couvert.
- Parmi les variables du couvert végétal à estimer, l'indice foliaire est le plus utilisé en agriculture. Il caractérise la taille des surfaces d'échange (rayonnement, eau, carbone) avec l'atmosphère. Des relations entre NDVI et LAI ont été mises en évidence, ces deux paramètres réagissent de façon identique dans le domaine spectral pour les mêmes structures végétales.
- Cet indice est aussi corrélé aux propriétés biophysiques de la couverture végétale telles que la quantité de radiation photosynthétiquement active absorbée (APAR), productivité, hauteur des arbres...etc. La bonne corrélation permet d'obtenir un modèle de régression et donc prédire la mesure in-situ de n'importe quel point en utilisant seulement l'image satellitaire. L'étape d'acquisition de données sur le terrain est importante la première année. Dans les prochaines années, il faut seulement analyser les images satellitaires. Il faut cependant réaliser quelques points de contrôle au sol chaque année afin de vérifier la robustesse des prédictions. Au final c'est un gain de temps pour l'expérimentateur en production végétale.
- Un NDVI est souvent utilisé dans le monde entier pour surveiller la sécheresse, surveiller et prévoir la production agricole, prédire les zones d'incendie dangereuses et cartographier les envahissements dans le désert.

##### 4.5.1.2.2 Points faibles de NDVI :

Les indices de végétation intrinsèques, sont néanmoins extrêmement sensibles aux propriétés optiques du sol sous-jacent et sont sujet à des erreurs très importantes quand la végétation est peu dense. Bien qu'il ne soit pas toujours approprié, le NDVI est de loin l'indice de végétation le plus utilisé dans tous les travaux.

#### 4.5.1.3 *Méthode Clg* :

La méthode Clg (Chlorophyll Index - Green, Indice chlorophyllien vert) est un indice de végétation qui permet d'estimer la quantité de chlorophylle des feuilles à l'aide du ratio de réflectivité dans les canaux proche infrarouge (NIR) et vert.

$$Clg = \frac{NIR}{Vert} - 1 \text{ ----- (14)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- Vert = valeurs de pixel du canal vert.

#### 4.5.1.4 *Méthode Clre* :

La méthode Clre (Chlorophyll Index - Red-Edge, Indice chlorophyllien - Red Edge) est un indice de végétation qui permet d'estimer la quantité de chlorophylle des feuilles à l'aide du ratio de réflectivité dans les canaux proche infrarouge (NIR) et Red Edge (portion de spectre dans le proche infrarouge).

$$Clre = \frac{NIR}{Rededge} - 1 \text{ ----- (15)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- Rededge = valeurs de pixel du canal Red Edge (730 nm).

#### 4.5.1.5 *Méthode GNDVI* :

La méthode GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index, Indice de végétation par différence normalisée vert) est un indice de végétation qui permet d'estimer la photosynthèse et qui est couramment utilisé pour définir l'absorption en eau et en azote dans la couverture végétale.

$$GNDVI = \frac{NIR - Vert}{NIR + Vert} \text{ ----- (16)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- Vert = valeurs de pixel du canal vert

Cet indice génère des valeurs comprises entre -1,0 et 1,0.

#### 4.5.1.6 *Méthode MTVI2* :

La méthode MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index, Indice de végétation triangulaire modifié) est un indice de végétation qui permet de détecter la chlorophylle des feuilles à l'échelle de la couverture végétale tout en étant relativement insensible à l'indice de surface foliaire. Cet indice utilise la réflectance dans les canaux vert, rouge et proche infrarouge (NIR).

$$MTVI2 = 1.5 (1.2 (NIR - Vert) - 2.5 (Rouge - Vert)) * \sqrt{((2NIR + 1)^2 - (6NIR - 5\sqrt{(Red)}) - 0.5)} \text{ - - (17)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- Rouge = valeurs de pixel du canal rouge
- Vert = valeurs de pixel du canal vert

#### 4.5.1.7 *Méthode NDVIre :*

La méthode NDVIre (Red-Edge NDVI, NDVI Red Edge) est un indice de végétation qui permet d'estimer l'état sanitaire de la végétation à l'aide du canal Red Edge. Ce canal est particulièrement utile pour estimer la santé des cultures pendant les phases intermédiaires et finales de la croissance, où la concentration de la chlorophylle est relativement plus importante. L'indice NDVIre sert également à cartographier la variabilité, au sein d'un champ, de la quantité d'azote absorbée par le feuillage pour mieux comprendre les besoins en fertilisant des cultures.

L'indice NDVIre est calculé à l'aide des canaux NIR et Red Edge.

$$\text{NDVIre} = \frac{\text{NIR} - \text{Rededge}}{\text{NIR} + \text{Rededge}} \text{ ----- (18)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- RedEdge = valeurs de pixel du canal Red Edge

Cet indice génère des valeurs comprises entre -1,0 et 1,0.

#### 4.5.1.8 *Méthode RTVICore :*

La méthode RTVICore (Red-Edge Triangulated Vegetation Index, Indice de végétation triangulé Red Edge) est un indice de végétation qui permet d'estimer l'indice de surface foliaire et la biomasse. Cet indice utilise la réflectance dans les canaux NIR, Red Edge et vert.

$$\text{RTVICore} = [100 (\text{NIR} - \text{RedEdge}) - 10 (\text{NIR} - \text{Vert})] \text{ ----- (19)}$$

- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- Rededge = valeurs de pixel du canal Red Edge
- Vert = valeurs de pixel du canal vert

### 4.5.2 Les indices prenant en compte la température de surface :

#### 4.5.2.1 *L'indice de température, végétation et sécheresse TDVI :*

Plusieurs études ont suggéré l'utilisation combinée de l'indice de végétation et de la température de surface des sols mesurée dans l'infrarouge thermique, pour estimer le taux d'humidité des sols, ainsi que l'état de stress hydrique des végétaux.

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 ci-dessous).

Le côté du triangle correspondant au NDVI le plus faible représente la droite des sols nus, depuis les sols secs (températures les plus élevées) jusqu'aux sols saturés en eau (températures 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'.

Dans cette méthode, 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



température de surface est faible. La végétation régule la température de surface en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration.

Sandholt et al. 2002 proposent un indice de température / végétation / sécheresse TDVI « Temperature Vegetation Dryness Index ». Son expression est la suivante :

$$TDVI = \frac{T_s - T_{s(min)}}{a + b NDVI - T_{s(min)}} \quad \text{----- (20)}$$

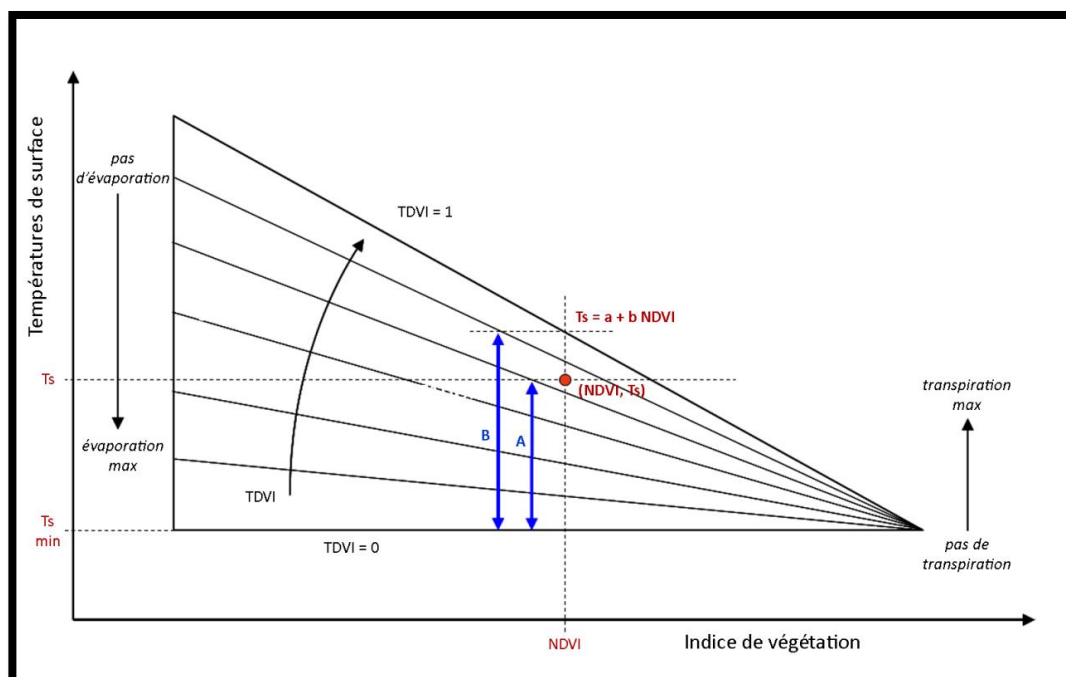
Où :  $T_s$ : température de surface

$T_{s(min)}$  : température de surface minimum

a et b: respectivement ordonnée à l'origine et pente de la droite reliant la température de surface au NDVI maximum.

Pour une même valeur de l'indice de végétation, les températures les plus élevées correspondent aux surfaces les plus sèches (figure ci-dessous). Il est donc possible d'estimer le taux d'humidité des sols et par conséquent, l'état de stress hydrique des plantes, dès lors que la température de surface et l'indice de végétation sont connus.

L'indice de sécheresse (TDVI) peut être estimé dans le plan  $T_s$  / NDVI par le rapport A/B :



**Figure 3 : Variation de la température de surface en fonction de NDVI**

Source : Sandholt et al., 2002

#### 4.5.3 Les indices prenant en compte l'influence des sols :

Ces indices ont été proposés pour objectif de corriger ou tout au moins, réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire. Trois types d'indices ont été développés :

- ✓ Les indices orthogonaux (comme l'indice perpendiculaire de végétation - PVI), caractérisés par la distance perpendiculaire entre un point qui représente le couvert végétal dans l'espace multispectral rouge / PIR et la droite des sols.
- ✓ Un deuxième type d'indices qui dérivent de la formulation du NDVI (comme l'indice de végétation ajusté aux sols - SAVI).
- ✓ Enfin la dernière catégorie d'indices combine les deux types précédents. C'est le cas des indices TSAVI et MSAVI.

#### 4.5.3.1 *L'indice perpendiculaire de végétation PVI :*

Il est similaire à un indice de végétation par différence; Cependant, il est sensible aux variations atmosphériques. Lorsque vous utilisez cette méthode pour comparer différentes images, elle ne doit être utilisée que sur des images qui ont été corrigées sur le plan atmosphérique.

Il a été proposé par Richardson et Wiegand (1977) suppose que la distance perpendiculaire soit linéairement reliée à la couverture végétale. Cela a pour conséquence de produire des isolignes de végétation (couverture végétale d'égale densité) parallèles à la droite des sols, ce qui n'est pas très représentatif de la réalité. En effet, Huete (1988) a montré que les pentes des lignes de végétation croissent avec l'augmentation de la biomasse végétale.

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2+1}} (\rho_{PIR} - a\rho_R - b) \text{ ----- (21)}$$

Où :

a : pente de la droite des sols dans l'espace (R, PIR)

b: ordonnée à l'origine de la droite des sols

Le PVI est défini comme étant cette distance :

$$PVI = \sqrt{(R(sol) - R(végé))^2 + (PIR(sol) - PIR(végé))^2} \text{ ----- (22)}$$

Où :

R (sol) = réflectance du sol dans le R

R (végé) = réflectance de la végétation dans le R

PIR (sol) = réflectance du sol dans le PIR

PIR (végé) = réflectance de la végétation dans le PIR

Puisque  $PIR(sol) = a * R(sol) + b$

Où : a = pente de la droite des sols

b = intersection avec l'axe PIR

PVI peut encore s'écrire :

$$PVI = \frac{PIR_{vég} - a * R_{vég} - b}{\sqrt{1+a^2}} \text{ ----- (23)}$$

Le PVI est nul pour des pixels correspondant aux sols, il est négatif pour des pixels correspondant à l'eau et aux nuages et il est positif pour des pixels correspondant à la végétation.

Soulignons que lorsque  $a = 1$  et  $b = 0$  le PVI équivaut au DVI.

Le PVI n'a une signification que sur des zones faiblement couvertes de végétation où le signal du sol est prépondérant, et se détériore lorsque la végétation se densifie.

Cet index fournit des valeurs comprises entre -1,0 et 1,0.

#### 4.5.3.2 *L'indice de végétation ajusté pour le sol SAVI :*

Huete (1988) propose un **indice de végétation ajusté pour le sol** : le SAVI qui introduit un paramètre d'ajustement, noté L, qui caractérise le sol et son taux de recouvrement par la végétation. Huete a montré que les isolignes de végétation ne sont pas parallèles à la droite des sols, mais qu'elles coupent celle-ci en un point selon la densité du couvert végétal. Le paramètre L prend la valeur de 0,25 pour une forte densité et de 1 pour une très faible densité de végétation. Pour des densités intermédiaires, il est égal à 0,5.

$$SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} \quad \text{-----} \quad (24)$$

Huete (1985) ne se satisfait pas des résultats du PVI et NDVI. Il prend en compte l'interaction complexe entre le feuillage et le sol et introduit le fait que le taux de couverture végétal est un paramètre fondamental dans la sensibilité des indices aux influences du sol.

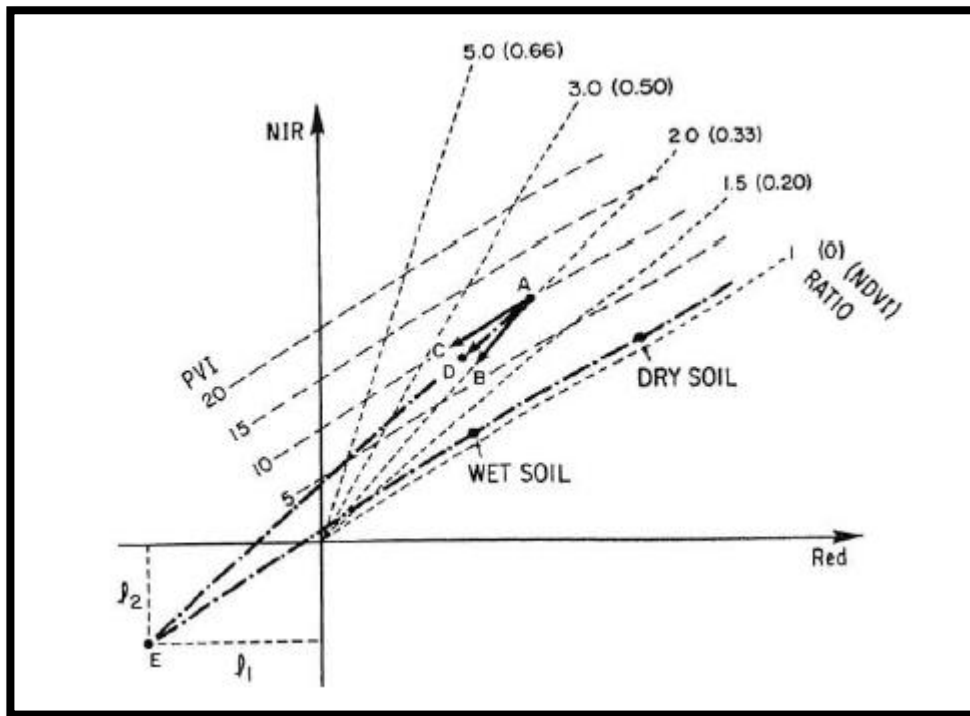
Lorsque la couverture est faible, il y a peu d'interaction entre le feuillage et le sol, le spectre du sol est peu modifié, les indices orthogonaux tels que le PVI sont alors efficaces. Lorsque la végétation devient dense et que le sol ne joue aucun rôle, les indices de type NDVI et SR deviennent utilisables.

Les indices portant sur des couvertures intermédiaires où l'interaction sol - feuillage est importante sont très affectés par le signal du sol.

Pour construire un indice plus adéquat, Huete (1988) part d'une observation et émet une hypothèse. Tous les indices utilisent une droite qui caractérise le sol dans l'espace spectral (R-PIR) (i.e. isoligne 0 ou 1 pour NDVI ou SR). Il fait l'hypothèse que la majorité des spectres des sols tombent sur ou près de cette droite, et que puisque cette droite intercepte l'axe PIR près de l'origine la valeur de SR, NDVI ou PVI ne varie que très peu pour un large éventail de sols.

Pour Huete (1988) le concept de la droite des sols fonctionne pour une couverture végétale donnée lorsqu'on modifie les propriétés optiques du sol sous-jacent. La figure 4 représente des isolignes de PVI, NDVI et SR. Selon la définition de l'indice de végétation ces isolignes représentent des lignes de végétation constante ou « isolignes de végétation ». Les isolignes des NDVI et SR ont des pentes croissantes avec la quantité de végétation alors que celles du PVI restent parallèles à la droite des sols. Les informations offertes par les deux types d'indices pour décrire le comportement spectral du sol et de la végétation sont donc contradictoires. Un couvert végétal sur un sol sec est représenté sur la figure 4 par le point A. Si le sol s'humidifie (ou s'assombrit, de manière plus générale), ce point doit subir une translation le long d'une isoligne de manière à normaliser ce changement.

Selon le NDVI et le SR le vecteur formé se dirige vers l'origine (AB). Selon le PVI le vecteur doit rester parallèle à la droite des sols (AC).



**Figure 4 : Comportement du NDVI, PVI et des isolignes de végétation dans l'espace spectral R-PIR**

Huete et al (1985) et Huete & Jackson (1988) ont étudié le comportement des isolignes de végétation soumises à différentes humidités et différents types de sols. Ils ont remarqué que les isolignes de végétation ont des pentes comprises entre celles des indices orthogonaux et fractionnels (AD). La pente et l'intersection augmentent avec la densité de végétation. Aucune ne converge vers l'origine (comme le veulent le NDVI et le RVI) ni n'est restée parallèle à la droite des sols (comme le veut le PVI).

Graphiquement, le comportement spectral des isolignes de végétation peut être modélisé par un glissement de l'origine du repère (R-PIR) vers le point de convergence des isolignes (E). Translater l'origine revient à ajouter une constante  $I_1$  aux réflectances dans le R et une  $I_2$  dans le PIR de telle manière que le NDVI devient :

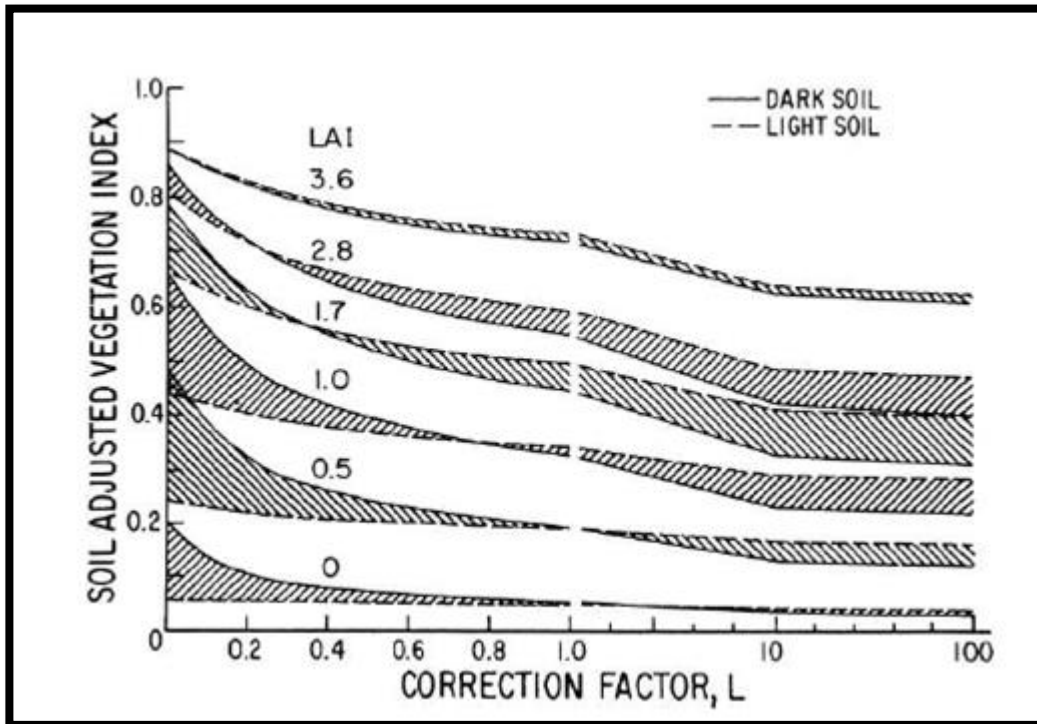
$$\frac{(NIR+I_2)-(R+I_1)}{(NIR+I_2)+(R+I_1)} \text{ ----- (25)}$$

Puisque la droite des sols a une pente proche de 1,  $I_1$  et  $I_2$  sont très proche. La translation de l'origine avec  $I_1 = I_2$  revient à ajouter une constante  $L = 2I_1$  au dénominateur du NDVI pour obtenir la formule suivante :

$$\frac{NIR-R}{NIR+R+L} \text{ ----- (26)}$$

De manière à garder le bornage [-1 ; 1] il faut multiplier l'équation précédente par  $(1 + L)$ . On obtient ainsi le SAVI « **Soil Adjusted Vegetation Index** »

$$SAVI = \frac{NIR-R}{(NIR+R+L) * (1+L)} \text{ ----- (27)}$$



**Figure 5 : Influence du sol (clair et foncé) sur le SAVI en fonction du facteur correctif L**

Le facteur correctif L dépend en réalité de la densité du feuillage et le meilleur ajustement dépendra du fait que l'utilisateur veuille analyser des faibles densités de végétation (L=1), des végétations intermédiaires (L=0,5) ou des végétations denses (L=0,25) (Figure 5). Néanmoins, Huete affirme dans son étude que pour un L = 0,5, le SAVI réduit de manière conséquente les variations induites par le sol et améliore la linéarité entre index et LAI en comparaison aux NDVI et PVI. Dans la littérature, l'indice SAVI est défini avec un facteur correctif L est égal à 0,5.

Cet index fournit des valeurs comprises entre -1,0 et 1,0.

#### 4.5.3.3 *L'indice transformé de végétation ajusté pour le sol TSAVI :*

- Baret et al. (1989) proposent une amélioration de l'indice SAVI. Leur indice transformé de végétation ajusté pour le sol TSAVI est basé sur la détermination préalable de la droite des sols à partir des bandes spectrales du capteur. Il utilise la pente a et l'ordonnée à l'origine b de la droite, plutôt que les valeurs arbitraires fixées pour l'indice SAVI.

$$TSAVI = \frac{a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{\rho_R + \rho_{PIR} - ab + X(1+a^2)} \text{ ----- (28)}$$

X = facteur atténuant la luminosité des sols généralement vaut 0,08.

TSAVI vaut 0 pour un sol nu et proche de 1 pour des LAI très élevé. Pour a=1 et b=0 TSAVI équivaut le NDVI.

#### 4.5.3.4 *L'indice modifié de végétation ajusté pour le sol MSAVI :*

Dans le même concept Qi et al. (1994) proposent eux aussi une amélioration du SAVI. Dans leur **indice modifié de végétation ajusté pour le sol MSAVI**, le paramètre L n'est plus une constante, mais il est ajusté automatiquement aux conditions locales. L'expression de l'indice MSAVI est la même que celle de l'indice SAVI. La différence concerne le facteur L qui dépend à la fois de la droite des sols, du NDVI et de l'indice de végétation par différence pondérée (en anglais, Weighted Difference Vegetation Index)

$$MSAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1+L) \text{ ----- (29)}$$

Avec :  $L = 1 - 2 a NDVI$ .WDVI ----- (30)

Où : a est la pente de la droite des sols

$$WDVI = \rho_{PIR} - a \rho_R \text{ ----- (31)}$$

#### **Remarque :**

La droite des sols doit être calculée à partir des points appartenant à la classe des sols et sélectionnés sur l'ensemble de la scène. Afin d'obtenir une droite représentative, il faut prendre des échantillons sur des zones de sols secs autant que sur des zones de sols humides car les valeurs de réflectances des sols diminuent avec leur contenu en eau.

#### 4.5.4 *Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère :*

Les gaz et aérosols présents dans l'atmosphère affectent le rayonnement électromagnétique par les processus de diffusion et d'absorption.

##### 4.5.4.1 *Atmospherically Resistant Vegetation Index ARVI:*

De manière à diminuer la dépendance du NDVI aux propriétés atmosphériques, Kaufman et Tanré ont proposé une modification de la formulation de l'indice en introduisant une information atmosphérique contenue dans la bande bleue.

Le choix de la bande bleue est expliqué selon la diffusion de Rayleigh comme suit : la diffusion d'une bande est proportionnelle à  $\frac{1}{\lambda^4}$  ( $\lambda$  est la longueur d'onde d'une bande). Donc plus la bande est courte, plus elle diffuse dans l'atmosphère et c'est le cas de la bande bleue et donc on peut considérer la bande bleue comme peu sensible aux diffusions atmosphériques.

$$ARVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_{RB}}{\rho_{PIR} + \rho_{RB}} \text{ ----- (32)}$$

Où :

$\rho_{RB}$  est une combinaison des réflectances dans les bandes spectrales bleu et rouge.

$$\rho_{RB} = \rho_R - \gamma (\rho_B - \rho_R) \text{ ----- (33)}$$

$\gamma$  est un facteur d'autocorrection atmosphérique qui dépend du type d'aérosols présents. Il est calculé à partir des réflectances intrinsèques de l'atmosphère dans les bandes bleue et rouge. ( $\gamma = 1$  est une bonne valeur lorsque cette information est inconnue).

Myeni et Asrar (1992) ont testé la sensibilité de cet indice et trouvé que l'ARVI réagissait de manière semblable au NDVI sur des données de réflectances spectrales collectées à la surface de la terre donc en l'absence d'atmosphère.

#### 4.5.4.2 *Indice de résistance atmosphérique visible VARI :*

VARI a supposé que l'effet dans le bleu était deux fois plus important que dans le rouge, donc pour corriger l'effet dans le rouge et le vert, nous avons soustrait le bleu. Ainsi, VARI a été transformé en l'indice de résistance atmosphérique visible suivant :

$$VARI = \frac{\rho_G - \rho_R}{\rho_G + \rho_R - \rho_B} \text{ ----- (34)}$$

$\rho_G$  = Réflectance de la bande verte

$\rho_R$  = Réflectance de la bande rouge

$\rho_B$  = Réflectance de la bande bleue

Il a été démontré que VARI fournit les meilleurs résultats globaux pour l'estimation de l'humidité du combustible dans les arbustes méditerranéens. La sensibilité de VARI aux effets atmosphériques est inférieure à celle de NDVI et elle est développée pour l'estimation de la fraction de végétation verte. Les bandes utilisées dans VARI sont sélectionnées en raison de leur sensibilité à la fraction de végétation. Contrairement au NDVI, qui est sensible aux changements de petites fractions de végétation et insensible aux changements de végétation modérée et élevée, VARI montre une réponse linéaire à la fraction de la végétation sur toute la gamme. Gitelson et al. (2002) ont montré que VARI permet d'estimer la fraction de végétation verte avec une erreur inférieure à 10%.

#### 4.5.4.3 *L'indice SR « RVI : Ratio Vegetation Index » :*

La méthode SR (Simple Ratio, Ratio simple) est un indice de végétation courant qui permet d'estimer l'étendue de la végétation. Il s'agit du ratio de luminosité dispersée dans le canal NIR et absorbé dans le canal rouge, qui réduit les effets de l'atmosphère et de la topographie. Le SR correspond à la pente de la droite reliant l'origine (0,0) au point représentant la végétation dans l'espace spectral à deux dimensions (R - PIR). Le SR varie entre  $[0, +\infty [$ .

Les valeurs sont élevées pour la végétation dont l'indice de surface foliaire est important, ou avec un haut degré de fermeture du couvert, et faibles pour les entités terrestres, aquatiques et non végétales. Les valeurs sont comprises entre 0 et 30 environ. Une végétation en bonne santé est généralement comprise entre 2 et 8.

$$SR = \frac{PIR}{Rouge} = \tan(\alpha) \text{ ----- (35)}$$

- ❖ NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- ❖ Rouge = valeurs de pixel du canal rouge

Cet indice pose des problèmes car il n'est pas aisément cartographiable vu ses valeurs extrêmes possibles s'étalant sur plusieurs ordres.

#### 4.5.4.4 *Méthode SRre :*

La méthode SRre (Red-Edge Simple Ratio, Ratio simple Red Edge) est un indice de végétation qui permet d'estimer l'étendue de la végétation saine et stressée. Il s'agit du ratio de luminosité dispersée dans les canaux NIR et Red Edge, qui réduit les effets de l'atmosphère et de la topographie.

Les valeurs sont élevées pour la végétation avec un haut degré de fermeture du couvert et une végétation saine, plus faibles pour un haut degré de fermeture du couvert et une végétation stressée, et faibles pour les entités terrestres, aquatiques et non végétales. Une végétation en bonne santé est généralement comprise entre 1 et 10.

$$SRre = \frac{NIR}{Rededge} \quad \text{-----} \quad (36)$$

- ❖ NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge
- ❖ RedEdge = valeurs de pixel du canal Red Edge

#### 4.5.4.5 *GEMI – Global Environment Monitoring Index :*

Pinty et Verstraete, 1992, quant à eux, proposent une relation non linéaire pour minimiser l'influence de l'atmosphère sur la mesure de l'indice de végétation, l'indice GEMI.

De manière indépendante, Pinty et Verstraete ont proposé un tout autre modèle. Ils ont analysé l'impact de l'atmosphère sur le RVI et sur le NDVI et étudié leur comportement pour différentes densités de végétation. Ils ont remarqué que l'atmosphère, même transparente, induisait des déviations conséquentes du RVI au dessus de feuillages denses, tandis que le NDVI était plus sensible sur des végétations peu denses. Contrairement aux autres approches qui utilisent des données caractérisant l'atmosphère, les auteurs ont créé un indice tout à fait empirique qui se comporte comme le RVI sur des végétations denses et comme le NDVI sur végétations peu denses c'est-à-dire moins sensible sur toute l'étendue des densités.

$$GEMI = \eta (1 - 0.25 \eta) - \frac{\rho_R - 0.25}{1 - \rho_R} \quad \text{-----} \quad (37)$$

$$\text{Avec : } \eta = \frac{2(\rho_{PIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5 \rho_{PIR} + 0.5 \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + 0.5} \quad \text{-----} \quad (38)$$

### 4.5.5 Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère :

#### 4.5.5.1 *L'indice de végétation amélioré EVI :*

On peut obtenir des indices qui corrigent les effets conjugués des sols et de l'atmosphère en combinant les indices présentés ci-dessus, notamment le SAVI et l'ARVI, comme l'indice de végétation amélioré EVI, produit standard adopté par la NASA pour les instruments TERRA et AQUA de MODIS.

$$EVI = G \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + 6 \rho_R - 7.5 \rho_B + 1} \quad \text{-----} \quad (39)$$



Où : G : facteur de gain (égal à 2,5)

#### 4.5.6 Les indices hydriques :

##### 4.5.6.1 NDSI :

L'indice de neige par différence normalisée (NDSI) est conçu pour identifier la couverture de neige tout en ignorant la couverture nuageuse. Comme il est basé sur des ratios, il atténue également les effets atmosphériques.

$$\text{NDSI} = \frac{\text{Vert} - \text{SWIR}_1}{\text{Vert} + \text{SWIR}_1} \text{ ----- (40)}$$

- Vert = valeurs de pixel de la bande verte
- SWIR = valeurs en pixels de la bande infrarouge à ondes courtes

##### 4.5.6.2 MNDWI :

L'indice d'eau de différence normalisée modifiée (MNDWI) utilise des bandes vertes et SWIR pour améliorer les caractéristiques d'eau libre. Il peut améliorer les caractéristiques des eaux libres tout en supprimant efficacement et même en supprimant le bruit des terrains construits ainsi que le bruit de la végétation et du sol et donc éviter que la surface d'eau extraite soit surestimée.

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Vert} - \text{SWIR}}{\text{Vert} + \text{SWIR}} \text{ ----- (41)}$$

- Vert = valeurs de pixel de la bande verte
- SWIR = valeurs en pixels de la bande infrarouge à ondes courtes.

Le calcul de la MNDWI produira les résultats suivants:

L'eau aura des valeurs positives alors que les terrains construits, le sol et la végétation auront des valeurs négatives car la végétation reflète la lumière SWIR encore plus que la lumière verte.

##### 4.5.6.3 NDMI :

L'indice d'humidité par différence normalisé (NDMI) est sensible aux niveaux d'humidité dans la végétation ce qui était prouvé grâce à leurs bonnes corrélations avec le taux d'humidité mesuré in-situ et donc déterminer les zones qui souffrent d'une sécheresse et donc les irriguer pour éviter une perte dans le rendement.

Il est utilisé aussi pour surveiller les niveaux de carburant dans les zones exposées aux incendies. Il utilise les bandes NIR et SWIR pour créer un rapport conçu pour atténuer l'illumination et les effets atmosphériques.

$$\text{NDMI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}_1}{\text{NIR} + \text{SWIR}_1} \text{ ----- (42)}$$

- NIR = valeurs de pixel de la bande proche infrarouge
- SWIR1 = valeurs en pixels de la bande 1 infrarouge à ondes courtes

## 4.5.7 Indices de paysage :

### 4.5.7.1 BAI :

L'indice de zone de combustion (BAI) utilise les valeurs de réflectance des parties rouge et NIR du spectre pour identifier les zones du terrain touchées par le feu.

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - \text{Rouge})^2 + (0.06 - \text{NIR})^2} \text{ ----- (43)}$$

- Rouge = valeurs de pixel de la bande rouge
- NIR = valeurs de pixel de la bande proche infrarouge

### 4.5.7.2 NBR :

L'indice de rapport de combustion normalisé (NBRI) utilise les bandes NIR et SWIR pour mettre en évidence les zones brûlées, tout en atténuant les effets d'éclairage et d'atmosphère. Vos images doivent être corrigées pour refléter les valeurs avant d'utiliser cet index. Une valeur NBR élevée indique une végétation saine, tandis qu'une valeur basse indique un sol nu et des zones récemment brûlées. Les zones non brûlées sont normalement attribuées à des valeurs proches de zéro.

$$NBR = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \text{ ----- (44)}$$

- NIR = valeurs de pixel de la bande proche infrarouge
- SWIR = valeurs en pixels de la bande infrarouge à ondes courtes

### 4.5.7.3 NDBI :

L'indice de construction de différence normalisée (NDBI) utilise les bandes NIR et SWIR pour mettre en valeur les zones construites par l'homme. Ce ratio est basé sur l'atténuation des effets des différences d'éclairage du terrain et des effets atmosphériques.

$$NDBI = \frac{\text{SWIR} - \text{NIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \text{ ----- (45)}$$

- SWIR = valeurs en pixels de la bande infrarouge à ondes courtes
- NIR = valeurs de pixel de la bande proche infrarouge

## 4.5.8 Indices géologiques :

### 4.5.8.1 *Minéraux argileux* :

Le taux argileux est un ratio des canaux SWIR1 et SWIR2. Ce ratio tient compte du fait que les minéraux hydrologiques comme l'argile et l'alunite absorbent le rayonnement de la portion 2.0–2.3 microns du spectre.

$$\text{Clay Minerals Ratio} = \frac{\text{SWIR 1}}{\text{SWIR 2}} \text{ ----- (46)}$$

- ❖ SWIR1 = valeurs de pixel du canal d'onde courte infrarouge 1

❖ SWIR2 = valeurs de pixel du canal d'onde courte infrarouge 2

#### 4.5.8.2 *Minéraux ferreux* :

Le ratio de minéraux ferreux met en évidence les minéraux à base de fer. Il utilise le ratio entre le canal SWIR et le canal NIR.

$$\text{Ferrous Minerals Ratio} = \frac{\text{SWIR}}{\text{NIR}} \text{ ----- (47)}$$

- SWIR = valeurs de pixel du canal d'onde courte infrarouge
- NIR = valeurs de pixel du canal proche infrarouge

#### 4.5.8.3 *Oxyde de fer* :

Le taux d'oxyde de fer est un ratio des longueurs d'ondes rouges et bleues. La présence de minerais limonitiques contenant des phyllosilicates et l'altération d'oxyde de fer limonitique entraîne l'absorption du canal bleu et de la réflectance du canal rouge. Ainsi, les surfaces qui présentent une altération prononcée d'oxyde de fer sont claires.

$$\text{Iron Oxide Ratio} = \frac{\text{Rouge}}{\text{Bleu}} \text{ ----- (48)}$$

- Rouge = valeurs de pixel du canal rouge
- Bleu = valeurs de pixel du canal bleu

La réflectance du sol nu dépend généralement de sa composition. Les sols riches en oxyde de fer avec sa couleur rouille ont une réflectance élevée dans la bande spectrale rouge - ce qui est excellent pour ce type de signature spectrale de sol.

#### 4.5.8.4 *Indice de forme* :

Indice qui permet de définir l'état de dégradation des sols en se basant sur la description de la forme des courbes de signatures spectrales. Il peut se formuler sous :  $IF = \frac{2R-V-B}{V-B}$  ----- (49)

Avec R = bande du rouge.

V = bande du vert.

B = bande du bleu.

- La réflectance élevée indique un sol dégradé et une teneur en matière organique faible et celle en oxydes de fer. Dans l'image se sont les pixels blancs.
- Plus le sol est développé, riche en matière organique, plus la réflectance diminue.

### 4.6 *Choix d'un indice* :

Le choix optimal d'un indice de végétation dépend du type d'étude, du type de végétation et de la quantité d'information disponible.

Si aucune information n'est connue concernant la droite des sols, ce qui arrive généralement dans des études plus globales, l'indice SAVI convient généralement mieux que le NDVI quelque soit le type de végétation. Le SARVI peut être préféré car il permet une meilleure

continuité temporelle grâce à une correction atmosphérique appliqué pixel par pixel. Notons que le facteur L du SAVI peut être ajusté en fonction de la densité de la végétation.

Si la droite des sols est connue, ce qui arrive généralement dans des études plus locales, ou le feuillage n'est pas trop dense le TSAVI est adéquat et d'un autre côté, les indices sol-ajustés tel que le SARVI sature moins vite que le NDVI sur des couverts denses et est plus adéquat pour l'extraction de paramètres plus liés à la structure du feuillage (LAI..). Si la végétation présente des variations de densité, il faut préférer le MSAVI. Le PVI peut être utilisé, mais uniquement sur des types de végétation très spartiate.

Les paramètres liés aux caractères chimiques des plantes (Indice de saponification, indice de peroxyde, acidité et indice d'iode) peuvent être déterminés en utilisant le NDVI.

Et parmi les méthodes utilisées pour le choix d'indice qui estime le plus efficacement le paramètre biophysique voulu (LAI,... etc.) pour une région donnée. Il s'agit de comparer les résultats calculés par une formule en fonction de chaque indice aux mesures effectuées in-situ et de l'indice qui donne des valeurs proches des mesures du terrain. Il sera utilisé pour estimer le paramètre pour toute la zone d'étude. Pour ce faire, la couverture au sol doit être mesurée au sol au même moment que le passage du satellite ou le drone à certains endroits dont les coordonnées sont connues afin de pouvoir bien les repérer sur l'image satellitaire.

En fait, il existe plusieurs indices de végétation mais l'indice choisi c'est celui qui a la meilleure corrélation avec les mesures in-situ de paramètre.

Concernant les autres indices, le choix est basé sur l'information recherchée (état sanitaire de végétation, vérification de l'état nutritionnel des plantes, existence de chlorophylle...)

#### **4.7 Limitations des indices de la végétation :**

Ces trois dernières décennies, les indices évoluaient vers une meilleure compréhension des propriétés biophysiques du couvert végétal et les contraintes qui limitaient l'extension de l'utilisation des indices à des échelles globales tant spatiales que temporelles étaient surmontées, les chercheurs proposaient des relations liants les indices aux paramètres clé de la végétation. Les qualités de ces relations empiriques liant les indices et les paramètres de la végétation sont jugées par leurs caractères linéaires.

Certains indices ont un réel potentiel à prédire certaines variables. Malheureusement, aucune généralisation quant aux relations, ou quant aux capacités des indices n'a encore trouvé de consensus. Ceci s'explique par deux raisons :

- Premièrement, il est difficile d'obtenir des conditions expérimentales comparables d'une étude à l'autre à cause du nombre important de variables non maîtrisées. Les relations sont donc très attachées aux conditions expérimentales liées à la couverture du sol, aux propriétés propres des couverts végétaux de l'étude.
- Deuxièmement, étant donné le grand nombre d'indices créés à ce jour, les études ne comparent pas nécessairement les mêmes indices et il est difficile de recouper les informations. D'autant plus que beaucoup d'études prétendent avoir trouvé un indice meilleur que les autres...

L'extraction de paramètres de la végétation à partir d'indices de végétation est quelque chose de possible. Cependant cela doit se faire à échelle très locale, dans des conditions locales où certains facteurs sont normalisés et où les coefficients des relations empiriques ne fonctionnent que dans ces conditions particulières.

## 4.8 Conclusion :

Les indices de végétation consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement. Il existe plusieurs types de ces indices (intrinsèques, hydriques, géologiques,...etc), ce qui permet de suivre la dynamique et les divers efficiences de la végétation et estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux.

## **Chapitre 5**

### **Le monitoring de la zone agricole de Boumerdès**

## 5 Le monitoring de la zone agricole de Boumerdès :

### 5.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter notre zone d'étude et les démarches utilisées dans la REUE de la STEP de Boumerdès pour irriguer les zones agricoles et la démarche proposée pour monitorer ces zones en commençant par l'acquisition des images satellitaires puis le prétraitement de ces images et enfin le calcul des indices de végétation.

### 5.2 Présentation de la zone d'étude :

#### 5.2.1 Délimitation spatiale :

La délimitation spatiale de la zone d'étude dépend essentiellement :

- Du site accueillant la station d'épuration de Boumerdès ;
- Des terres à irriguer à partir des eaux usées épurées de la STEP de Boumerdès.

#### 5.2.2 Localisation géographique :

##### 5.2.2.1 *La zone d'étude* :

La zone d'étude est située à 50 km à l'Est d'Alger, dans la wilaya de Boumerdès et s'étend sur une superficie globale de 18,61 Km<sup>2</sup>.

La zone d'étude regroupe les communes de BOUMERDES, CORSO et TIDJELLABINE. Elle est délimitée :

- Au Nord : par la mer méditerranée.
- Au Sud : par les communes de Keddara et Beni amrane.
- A l'Est : par la commune de Thenia.
- A l'Ouest : par la commune de Boudouaou.



**Figure 1 : La zone d'étude**

#### 5.2.2.2 De la STEP de Boumerdès :

La station d'épuration de Boumerdès est destinée à épurer les eaux usées urbaines de la ville de BOUMERDES et des communes limitrophes Tidjelabine et Corso. Elle est située en zone côtière, sur le territoire du chef-lieu de la wilaya, soit la commune de Boumerdès.

La STEP se situe à 2,5 Km au Sud-ouest de l'agglomération de Boumerdès , en contre bas de la Route Nationale RN 24 sur la rive gauche de l'Oued Tatareg et à proximité de la confluence de celui-ci avec l'Oued Safsaf.

La station occupe une superficie totale de 3,11 hectares et une capacité de traitement de 75.000 Equivalent Habitant. La cote du terrain varie de 21 à 23 m environ.

La STEP se trouve localisée dans la partie Sud de la ville de Boumerdès entre les coordonnées géographiques :

**Longitude :** 3°27'30'' et 3°30'00'' Est

**Latitude:** 33°42'30'' et 36°45'00'' Nord





**Figure 2 : La station d'épuration de Boumerdès**

### 5.2.3 Présentation de la STEP :

La station d'épuration de BOUMERDES est du type « boues activées à faible charge massive ou aération prolongée », elle a été mise en service en Janvier 2001 et est exploitée par l'ONA depuis 2005. Elle a une capacité nominale de 15.000 m<sup>3</sup>/j et 75.000 EH. C'est une usine moderne située dans la commune de BOUMERDES et assure l'épuration des eaux usées provenant des communes de Boumerdès, Tidjelabine et Corso.

#### 5.2.3.1 *Descriptif technique de la STEP :*

Le système d'épuration se compose de trois files de traitement identiques, ceci afin de garantir une plus grande souplesse d'exploitation.

##### 5.2.3.1.1 Concept de la STEP :

La station d'épuration de BOUMERDES fonctionne sur la base de la procédure « Boue activée à faible charge », elle est équipée d'ouvrages d'épuration physique et biologique.

- Les ouvrages d'épuration physique comprennent un dégrilleur, un dessableur/déshuileur, le traitement physique permet d'éliminer les matières grossières, les flottants et les substances décantables. Il est suivi d'un traitement biologique, qui assure quant à lui l'élimination des matières dissoutes ou à fines particules.

- L'épuration biologique est décomposée comme suit : d'abord, un traitement par boues activées à faible charge et ensuite une clarification (décantation). Les boues produites sont déshydratées mécaniquement sur filtres à bandes.

#### 5.2.3.1.2 Description des ouvrages :

##### 5.2.3.1.2.1 Ligne de traitement des eaux :

- **L'arrivée des eaux et bassin d'orage** : une partie des effluents est envoyée par gravité dans la bache de relèvement et l'autre partie par pompage directement dans le canal d'alimentation du prétraitement. Ceci par deux conduites de diamètre 60 mm. Un déversoir alimente un bassin d'orage de tout débit supérieur au débit accepté par l'installation, deux pompes submersibles permettent de relever ces eaux vers le prétraitement sur la base de vidange du bassin plein afin de réguler le débit entrant.
- **Un dégrilleur fin** à nettoyage automatique est monté dans un canal de 1 m de large. Il est composé d'une grille courbe en acier galvanisé avec espacement entre barreaux de 20 mm. Les refus sont évacués par convoyeur à vis vers une benne. Le dégrilleur est isolé par des batardeaux en aluminium à commande manuelle.
- **Deux dessableurs - dégraisseurs** circulaires brassés à l'air par insufflation à partir d'une soufflante immergée. Un racleur permet de récupérer les graisses qui sont dirigées vers une trémie, la quantité de graisses piégées est de l'ordre de 5 à 15 mg/l. Le sable ainsi que les matières lourdes sont recueillis à la partie inférieure des bassins, la quantité de sable piégée est de l'ordre de 15 à 40 mg/l. Le mélange eau-sable est relevé au moyen d'air lift et est déversé par l'intermédiaire d'une tuyauterie dans un extracteur laveur qui en assure à la fois l'essorage et son relevage après égouttage le long d'un plan incliné à l'extrémité duquel le sable égoutte tombe dans une benne ou tout autre dispositif de stockage.
- **Un ouvrage de répartition** permet d'aiguiller l'eau à traiter vers les différentes files de traitement par l'intermédiaire de batardeaux. Une lame de surverse sert de by-pass de l'aération en cas de surdébit.
- **Trois bassins d'aération** brassés travaillant à faible charge massique ( $C_m = 0,076 \text{ Kg DBO}_5 / \text{kg MES. j}$  et  $C_v = 0,38 \text{ kg DBO}_5 / \text{m}^3 \cdot \text{j}$ ), les dimensions de chaque bassin sont :  
 $L_U = 55,5 \text{ m}$   
 $l_U = 15,5 \text{ m}$   
 $H = 4,5 \text{ m}$   
 $V = 3600 \text{ m}^3$
- **Système d'aération par des turbines de surface type « acti-rotor »** dont chaque bassin est composé de trois (03) aérateurs d'une puissance de 45,3kw chacun. Le système est muni d'un analyseur d'oxygène dissous automatique pour la régulation du fonctionnement des aérateurs.
- **Trois décanteurs** en béton de diamètre intérieur de 24 m, et hauteur latérale d'eau de 2,60 m avec raclage diamétral. Chaque décanteur est équipé d'un pont racleur radial, actionné par un motoréducteur d'entraînement. Les racleurs de fond sont fixés sous la passerelle pivotant sur la colonne centrale de l'ouvrage et récupère les boues qui sont dirigées vers l'ouvrage de recirculation. Les flottants pouvant se trouver à la surface sont repris par une lame de surface qui le guide progressivement vers un puits de reprise des flottants situé en un point de la périphérie de l'ouvrage. Les eaux clarifiées sont recueillies par surverse sur un déversoir circulaire constitué de lames crénelées en acier galvanisé.
- **Fosse de recirculation** : attenante aux aérations contient les 2 pompes de recirculation des boues ainsi que la pompe d'extraction des boues vers épaisseur.

➤ **Canal de comptage et désinfection** : l'eau clarifiée est dirigée vers un ouvrage en béton comportant un certain nombre de canaux en chicane. Un premier canal permet la mesure du débit d'eau épurée. Une série de canaux en chicane permet d'assurer un contact prolongé entre l'eau à désinfecter et l'eau chlorée. La dose de chlore prévue est de  $9,5 \text{ g/m}^3$  et est assurée par un ensemble de chloration à partir de chlore gazeux. Les dimensions de l'ouvrage sont : Volume total :  $385 \text{ m}^3$  et la largeur des canaux : 1 m

Au niveau de l'exutoire des eaux usées épurées (le bassin de chloration), une place fût créée pour trois pompes électriques qui pompent les eaux dans une conduite d'amenée d'une longueur de 5 km jusqu'aux bassins des deux exploitants. A l'heure actuelle, que deux pompes y sont installées. Toutefois en saison d'irrigation les trois pompes sont utilisées.

Au niveau de la chloration un emplacement pour trois pompes électrique d'une capacité chacune de  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  a été construit. La conduite d'amené a une longueur de 5 002 m jusqu'au premier bassin de stockage.

Les deux exploitations possèdent chacune un bassin de stockage dont les capacités sont respectives de  $3000 \text{ m}^3$  et de  $8000 \text{ m}^3$ . Les bassins sont en terre et présentent des pertes dues à l'infiltration.

Il existe pour ramener les eaux dans les différents casiers destinés à des cultures différentes à l'intérieur des exploitations un système ad-hoc de tuyaux. L'un des exploitants a un système d'environ 1,5 km de tuyaux secondaires et deux bornes d'irrigation. L'irrigation se fait par goutte-à-goutte pour toutes les cultures.

#### 5.2.3.1.3 Le traitement tertiaire :

Les filières classiques d'épuration biologique des eaux résiduaires urbaines (ERU) produisent une eau clarifiée présentant une pollution résiduelle non négligeable, pouvant être incompatible avec :

- la protection des exutoires naturels fragilisés, classifiés en zones sensibles à l'eutrophisation
- un rejet dans une zone bactériologiquement sensible (zones de baignade, zones ostreicole et conchylicole) ;
- une réutilisation de l'eau, à des fins agricoles, industrielles ou autres.

Les traitements tertiaires, dans le cadre de ce projet, ont pour objectif principal de réduire les concentrations de l'eau à la sortie de la clarification en:

- matières en suspension ;
- micro-organismes.

Le procédé par boues activées a peu d'effet sur l'élimination des kystes de protozoaires et sur les œufs d'helminthes, même si une partie des œufs est éliminée dans le décanteur secondaire, en plus la STEP n'est pas conçue pour réduire la teneur en azote et phosphore des eaux usées, ces teneurs dans les EUE demeurent assez intéressantes pour assurer un apport fertilisant aux cultures.

#### *5.2.3.1.3.1 Différents types de traitement tertiaire :*

Les traitements tertiaires peuvent être constitués par l'un et/ou l'autre des procédés suivants :

- La filtration ;
- La désinfection.

##### *5.2.3.1.3.1.1 La filtration :*

La filtration a pour but la rétention des matières en suspension, et en particulier des floccs s'échappant des clarifications secondaires.

Les types de filtres sont classés suivant la vitesse de filtration :

- Filtres lents : 1 à 2 m/h ; sont efficaces mais exigent de grandes surfaces
- Filtres rapides : 4 à 25 m/h ; sont les plus répons.

**Remarque :** Les œufs d'Helminthe, bien protégés et agglomérés sur les MES, ne sont pas touchés par les différents modes de désinfection. Par contre, la filtration sur matériaux granuleux permet d'atteindre une concentration finale inférieure à 1 par litre.

Pour obtenir une bonne désinfection, il est par ailleurs indispensable que la turbidité de l'eau soit inférieure à 1 NTU. (Mémento technique de l'eau).

##### *5.2.3.1.3.1.2 La désinfection :*

L'éventail des techniques de désinfection est assez large, mais, en pratique, les seuls couramment utilisés aujourd'hui sont :

- la chloration.
- la chloration-déchloration.
- l'ozonation.
- la radiation par ultraviolets.
- les lagunes de désinfection.

Une étude technico-économique a été faite par le bureau d'études NEE pour le choix de la meilleure technique du traitement tertiaire. La chloration et l'ozonation ont été éliminées au départ car la première peut produire des résidus organiques toxiques pour les êtres humains et la vie aquatique et l'ozonation est un procédé de désinfection très cher. L'étude a permis de déduire que la désinfection par les **rayonnements UV** représente le coût d'investissement le plus intéressant comparativement aux autres variantes.

#### 5.2.3.1.3.2 Ligne de traitement des boues :

Il s'agit d'une étape intermédiaire dans la diminution du volume de boues produites par la station « Les boues excédentaires ». Le traitement des boues comporte deux étapes : un épaissement statique, et une déshydratation mécanique.

- **Recirculation des boues activées** en tête des bassins biologiques par deux pompes avec une vitesse de 1470 tr/mn.
- **Un épaisseur** en béton de 13 m de diamètre. Equipé d'un pont racleur diamétral a entrainement central supporte par une colonne centrale en béton arme. Les boues sont admises dans la partie centrale de l'ouvrage et guidées vers le fond à l'aide d'un déflecteur métallique.

Les boues épaissies sont reprises au fond de l'ouvrage a l'aide d'une pompe à rotor excentre pour être refoulées vers la déshydratation.

- **Un local de déshydratation mécanique** : avant d'être déversé sur la première toile dans une zone d'égouttage, les boues épaissies sont d'abord floculées à l'aide d'un polyélectrolyte. Après cette première partie, la boue est soumise à une compression progressive de deux toiles suivie d'un enroulement sur un tambour jusqu'au séchage. Les deux toiles passent ensuite sur une série de rouleaux qui augmente la pression d'essorage et améliore la déshydratation finale. Les boues déshydratées sont dégagées par deux racloirs pour évacuation sur une bande transporteuse, ensuite vers une benne prévues à cet effet.

Actuellement, les boues produites par la STEP de Boumerdès sont évacuées directement vers la **décharge de Tidjelabine**.

D'après l'étude technico-économique par le bureau d'étude NEE des différentes méthodes de valorisation des boues, on peut conclure que :

- ✓ Les investissements et les couts de fonctionnement de l'incinération des boues, font que cette solution ne s'adapte qu'à de gros gisements de boues issus des grandes stations d'épuration. Pour les stations de petite taille la co-incinération avec les ordures ménagères présente des solutions avantageuses. Mais pour répondre aux exigences de ces deux solutions, les boues doivent avoir des caractéristiques spécifiques. De plus il représente un cout de fonctionnement très élevé.
- ✓ L'épandage des boues permet aux agriculteurs de réduire leurs dépenses en matière d'engrais. De lutter contre les problèmes de dégradation de la structure des sols et de baisse de rendement causés par l'intensification de l'agriculture. Et du point de vue économique, il n'est pas couteux. L'épandage des boues présente donc la meilleure solution pour valoriser les boues issues de la STEP de Boumerdès. Il présente un intérêt économique et peut contribuer au développement agricole. De plus la nature des productions agricoles actuelles de la willaya de Boumerdès (Grandes cultures), sont compatibles avec l'épandage des boues.

#### 5.2.3.1.3.3 Laboratoire d'analyse :

La STEP est équipée d'un laboratoire d'analyse pour le suivi de la qualité des eaux et des boues.

Les fréquences de contrôle telles que précisées dans le marche sont les suivantes :

- eaux usées épurées (sortie) = 1 mesure hebdomadaire

- boues = 1 mesure hebdomadaire

Le laboratoire est principalement calibré pour le suivi des paramètres d'exploitation et l'auto-surveillance (exemple : DCO, MES...). La capacité à réaliser des analyses de contrôle poussées de la qualité des boues et de la REUE n'est pas garantie à ce jour (exemple analyses ETM, coliformes...).

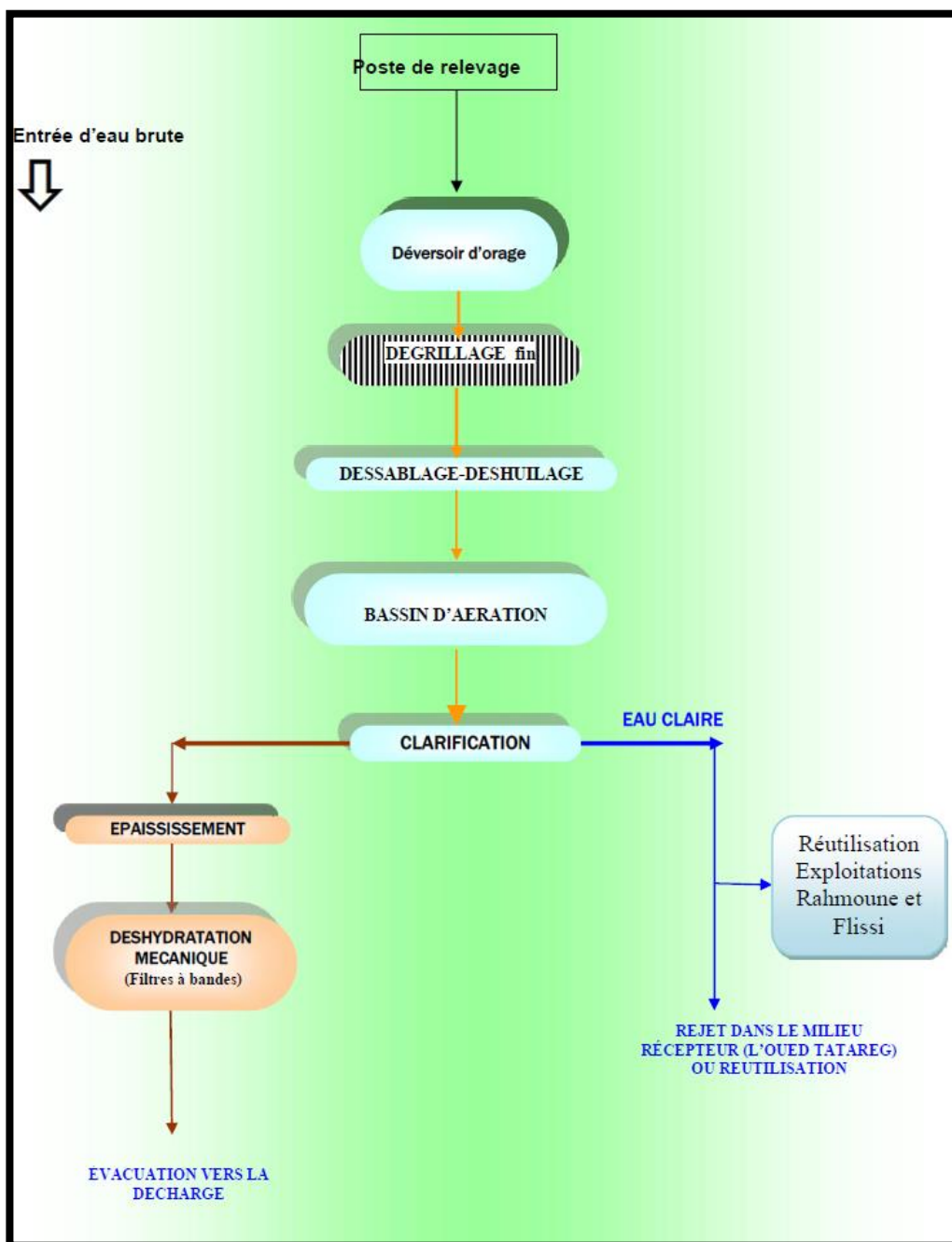


Figure 3 : Schéma de la STEP de BOUMERDES

## 5.3 Acquisition et correction des images satellitaires :

### 5.3.1 L'acquisition de l'image satellitaire :

Les images satellitaires utilisées sont obtenues à partir de l'interface utilisateur EarthExplorer (EE) « earthexplorer.usgs.gov » qui est un outil de recherche, de découverte et de commande en ligne développé par l'United States Geological Survey (USGS). EE prend en charge la recherche dans les inventaires de satellites, d'aéronefs et d'autres inventaires de télédétection grâce à des fonctionnalités de requête interactives et textuelles.

Parmi les satellites qui sont fonctionnelles jusqu'à ce jour Landsat 8 et Sentinel 2.

- Les données de niveau 1 de Landsat Collection 1 représentent des nombres numériques et ne sont pas corrigées.

- Les données de Sentinel 2 représentent les réflectances du haut de l'atmosphère multipliées par 10000 (ceci est une raison technique pour un meilleur stockage).

Les bandes spectrales de chaque satellite sont :

**Tableau 1 : Les bandes spectrales de Landsat 8**

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution	Irradiance solaire
Bande 1 - Côtier/Aérosol	0.433 – 0.453 $\mu\text{m}$	30 m	2031 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 2 - Bleu	0.450 – 0.515 $\mu\text{m}$	30 m	1925 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 3 - Vert	0.525 – 0.600 $\mu\text{m}$	30 m	1826 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 4 - Rouge	0.630 – 0.680 $\mu\text{m}$	30 m	1574 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 5 - Infrarouge proche	0.845 – 0.885 $\mu\text{m}$	30 m	955 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 6 - Infrarouge à ondes courtes	1.560 – 1.660 $\mu\text{m}$	30 m	242 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 7 - Infrarouge à ondes courtes	2.100 – 2.300 $\mu\text{m}$	30 m	82.5 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 8 - Panchromatique	0.500 – 0.680 $\mu\text{m}$	15 m	1739 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 9 - Cirrus	1.360 – 1.390 $\mu\text{m}$	30 m	361 W/ ( $\text{m}^2\mu\text{m}$ )
Bande 10-Infrarouge thermique 1	10.30 - 11.30 $\mu\text{m}$	100 m	
Bande 11-Infrarouge thermique 2	11.50 - 12.50 $\mu\text{m}$	100 m	

## Sentinel 2 :

**Tableau 2 : Les bandes spectrales de Sentinel 2**

Bandes de Sentinel 2	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Résolution spatiale (m)
	Longueur d'onde centrale (nm)	Bande passante (nm)	Longueur d'onde centrale (nm)	Bande passante (nm)	
Band 1 – Aérosol côtier	442.7	21	442.2	21	60
Band 2 – Bleu	492.4	66	492.1	66	10
Band 3 – Vert	559.8	36	559.0	36	10
Band 4 – Rouge	664.6	31	664.9	31	10
Band 5 – Bord de végétation rouge	704.1	15	703.8	16	20
Band 6 – Bord de végétation rouge	740.5	15	739.1	15	20
Band 7 – Bord de végétation rouge	782.8	20	779.7	20	20
Band 8 – Proche de l'infrarouge	832.8	106	832.9	106	10
Band 8A – Narrow NIR	864.7	21	864.0	22	20
Band 9 – vapeur d'eau	945.1	20	943.2	21	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
Band 11 – Infrarouge à ondes courtes 1	1613.7	91	1610.4	94	20
Band 12 – Infrarouge à ondes courtes 2	2202.4	175	2185.7	185	20

Dans ce projet, les images satellitaires de Sentinel 2 seront utilisées pour plusieurs raisons :

- Les données de Sentinel 2 contiennent plus de bandes nécessaires pour le calcul des indices de végétation que celles de Landsat 8.
- Elles représentent des réflectances du haut de l'atmosphère donc elles nécessitent qu'une correction atmosphérique au contraire de celles de Landsat 8 qui nécessitent une correction radiométrique et atmosphérique.
- La résolution spatiale de la bande multispectrale de Sentinel 2 est 10 m alors que celle de Landsat 8 vaut 15 m.

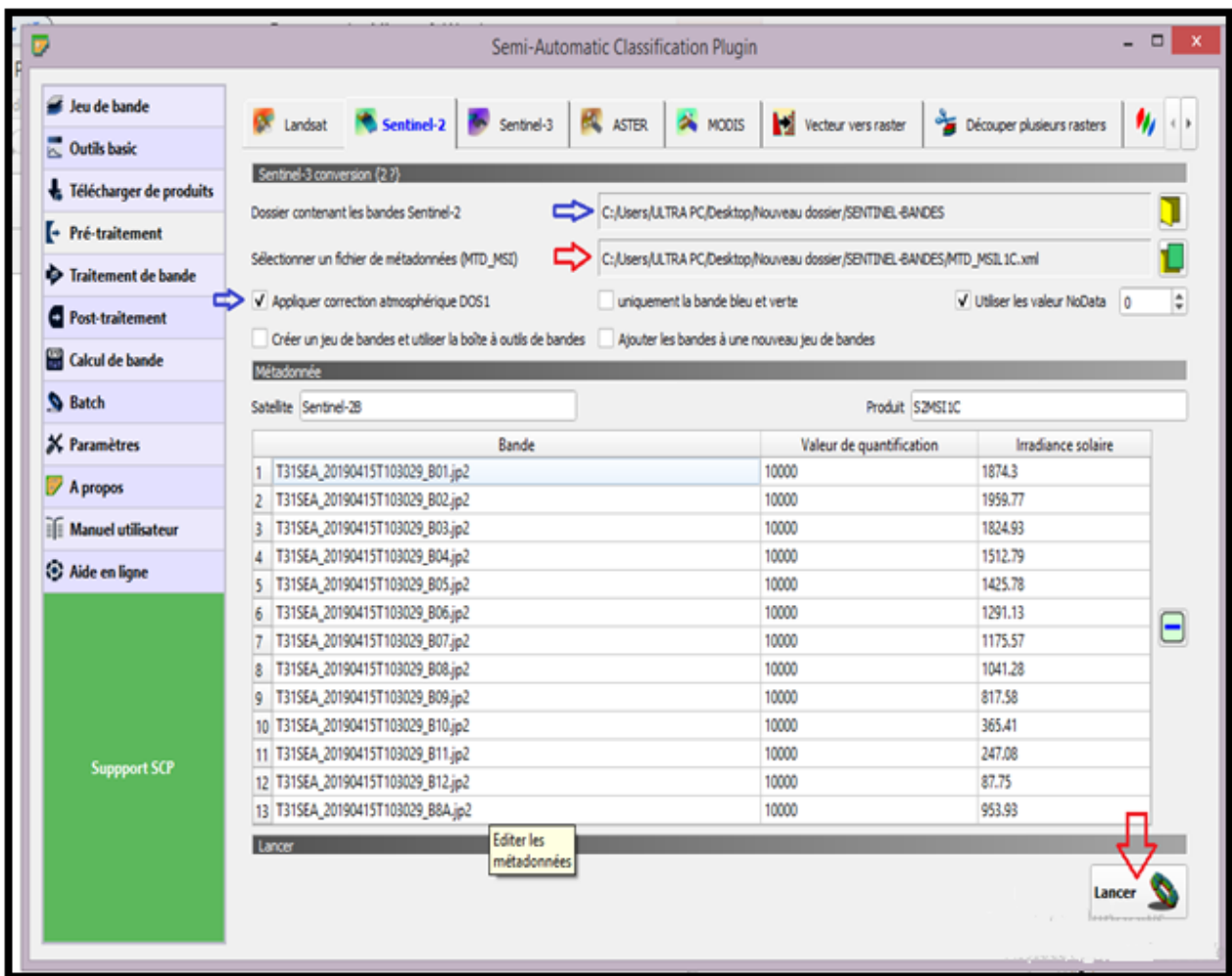
Les images satellitaires de Sentinel 2 qui contiennent la zone d'étude ont été acquises le 15 Avril 2019.



### 5.3.2 La correction des images satellitaires :

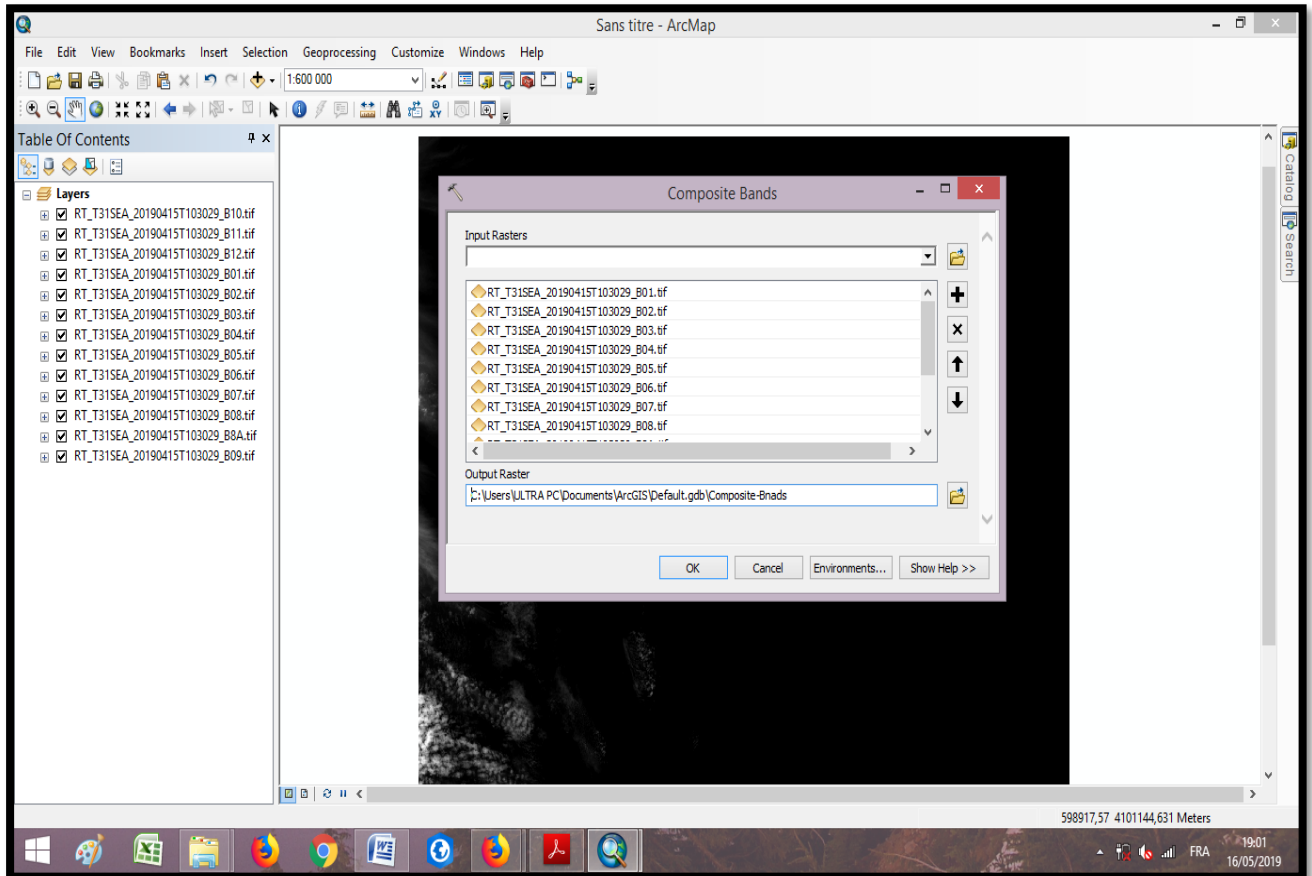
La correction des bandes est effectuée en utilisant QGIS comme suit :

- Introduire les bandes et les métadonnées.
- Cocher les casiers « Appliquer la correction atmosphérique DOS1 » et « Utiliser les valeurs NoData = 0 »
- Lancer la correction.

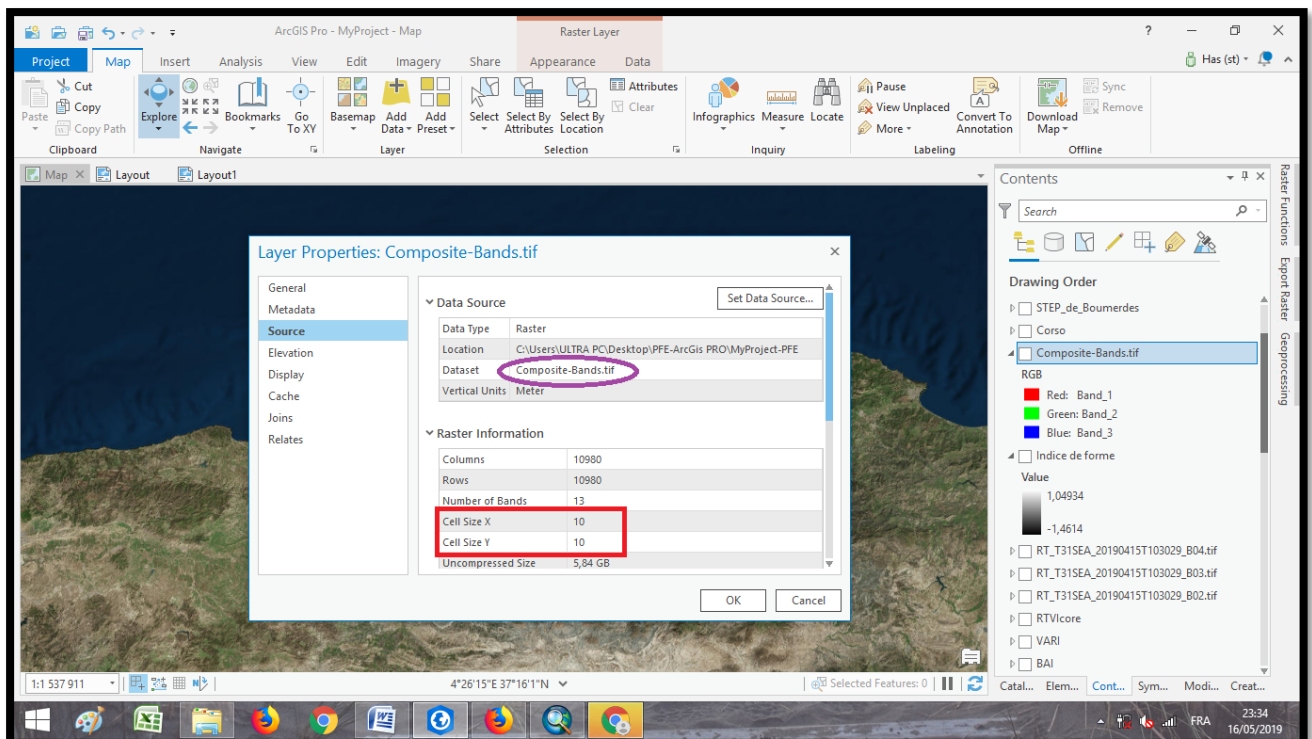


**Figure 4 : La correction atmosphérique en utilisant QGIS**

Après l'étape de correction, des bandes corrigées atmosphériquement ont été obtenues. Puis, l'outil « Composite Bands » d'ArcGis est appliqué afin d'obtenir une bande multispectrale dont la plus petite résolution de ses bandes vaut 10x10 m.

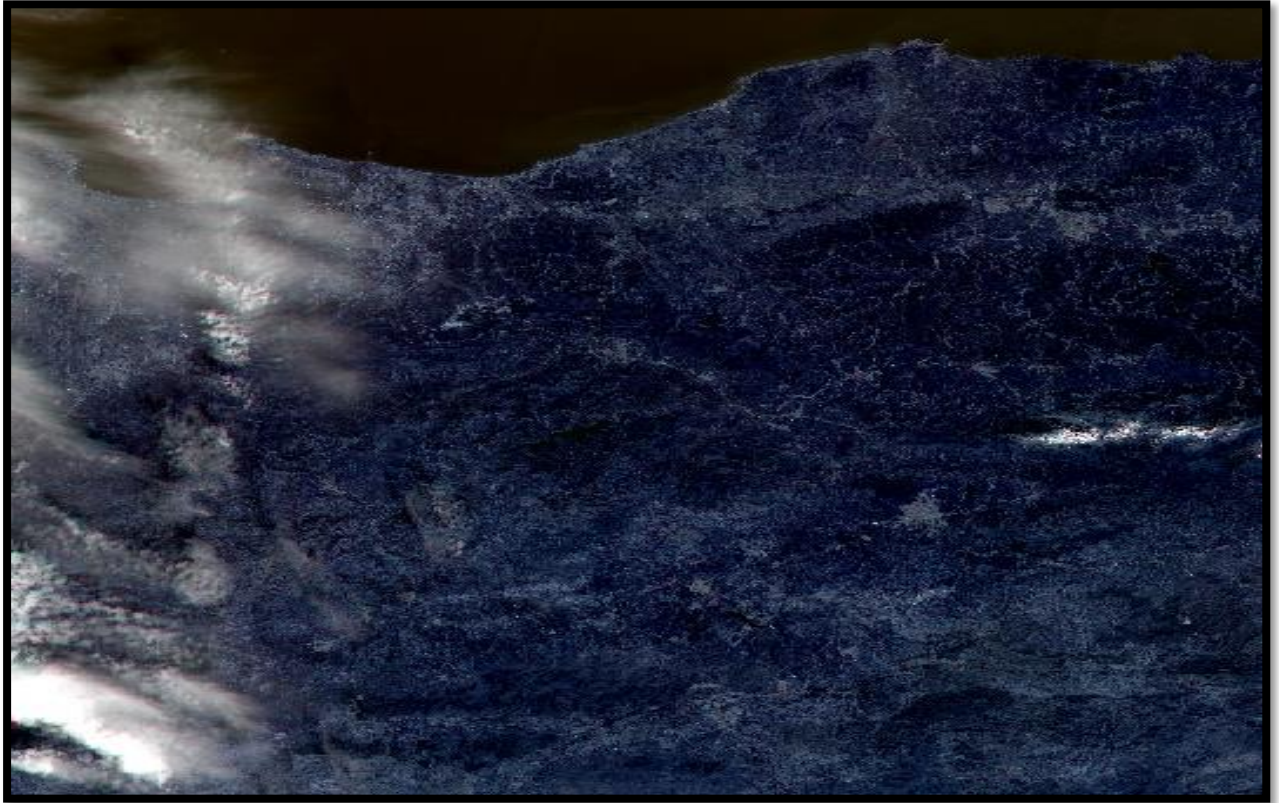


**Figure 5 : Composite bands en utilisant ArcGis**

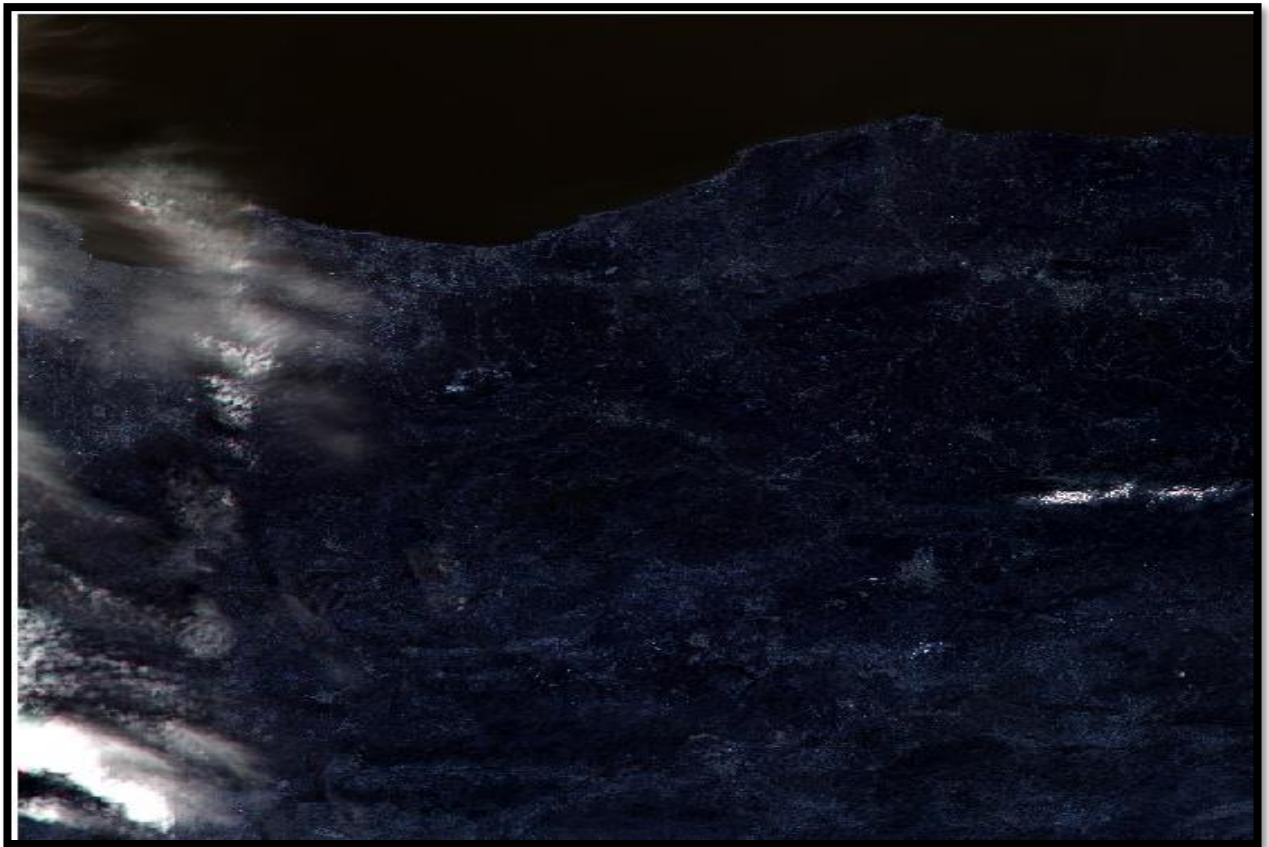


**Figure 6 : La résolution de la bande multispectrale**

Voici la bande multispectrale obtenue :



**Figure 7 : Bande multispectrale avant la correction atmosphérique**



**Figure 8 : Bande multispectrale après la correction atmosphérique**

Par la suite, la bande multispectrale sera sauvegardée et utilisée dans le calcul des indices, en l'exportant sous forme de raster.

## 5.4 Calcul des indices de végétation :

### 5.4.1 SIG :

Les SIG regroupent différentes méthodes et techniques informatiques, permettant de modéliser, de saisir sous forme numérique, de stocker, de gérer, de consulter, d'analyser, de représenter des objets ou des collections d'objets géographiques, avec la particularité essentielle de prendre en compte les caractéristiques spatiales de ces objets au même titre que les attributs descriptifs qui y sont attachés. Le SIG est conçu pour répondre à des besoins précis qui déterminent une modélisation finalisée du monde réel en se basant sur des objets géographiques, comme les polygones, les lignes et les points, auxquels sont associées des données qualitatives, telles que les caractéristiques naturelles.

Pour calculer les indices de végétation, ArcGIS Pro a été mis en œuvre.

### 5.4.2 ArcGIS Pro :

ArcGIS Pro est le dernier logiciel SIG du bureau professionnel d'Esri. ArcGIS Pro vous permet d'afficher, explorer, analyser, modifier et partager des cartes et des données. Un projet ArcGIS Pro peut contenir de nombreuses cartes et mises en forme, ainsi que des tableaux, des graphiques et d'autres éléments. Les fonctionnalités 3D sont natives d'ArcGIS Pro; toute carte 2D peut être convertie en une scène 3D.

#### Ruban :

ArcGIS Pro utilise un ruban horizontal en haut de la fenêtre de l'application pour afficher et organiser les fonctionnalités dans une série d'onglets. Certains de ces onglets (onglets principaux) sont toujours présents. D'autres (onglets contextuels) apparaissent lorsque l'application est dans un état particulier.

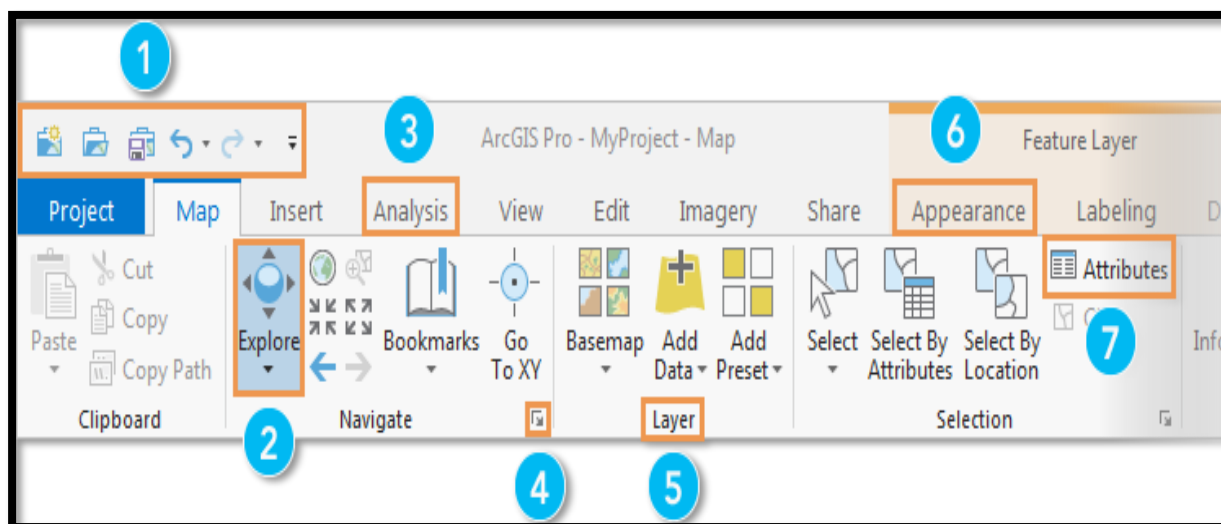


Figure 9 : Les éléments du ruban

**Tableau 3 : ArcGIS Pro éléments du ruban**

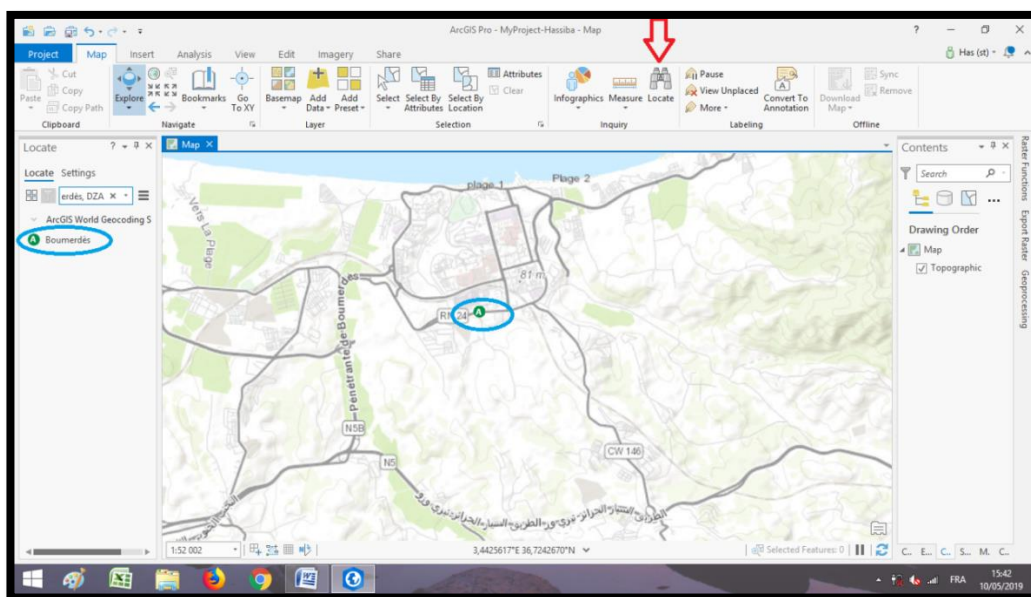
Elément	Description
1	La barre d'accès rapide contient des commandes couramment utilisées. Il peut être personnalisé.
2	L'outil Explorer permet de parcourir les cartes et les scènes et d'identifier les entités par le biais de fenêtres contextuelles.
3	Les onglets du ruban, tels que l'onglet Analyse, organisent les fonctionnalités. Lorsqu'un onglet est sélectionné, ses outils associés s'affichent sur le ruban.
4	Les lanceurs de boîtes de dialogue ouvrent des volets ou des boîtes de dialogue.
5	Les groupes organisent les fonctionnalités sur un onglet du ruban.
6	Les groupes d'onglets contextuels et les onglets associés apparaissent dans des conditions spécifiques. Les groupes d'onglets sont surlignés dans une couleur telle que l'orange ou le vert.
7	Les boutons et les outils exécutent des actions logicielles.

Les étapes à suivre sont :

**Ouvrir le projet :**

1. Démarrer ArcGIS Pro.
2. Sous la liste Recent Projects (Projets récents), cliquez sur Open another project (Ouvrir un autre projet) 📁.
3. Dans la boîte de dialogue Ouvrir le projet, sous Portail ☁️, cliquez sur L'intégralité du portail ☁️.
4. Localisez la zone de recherche en utilisant « Locate » à partir de l'onglet « Map ».

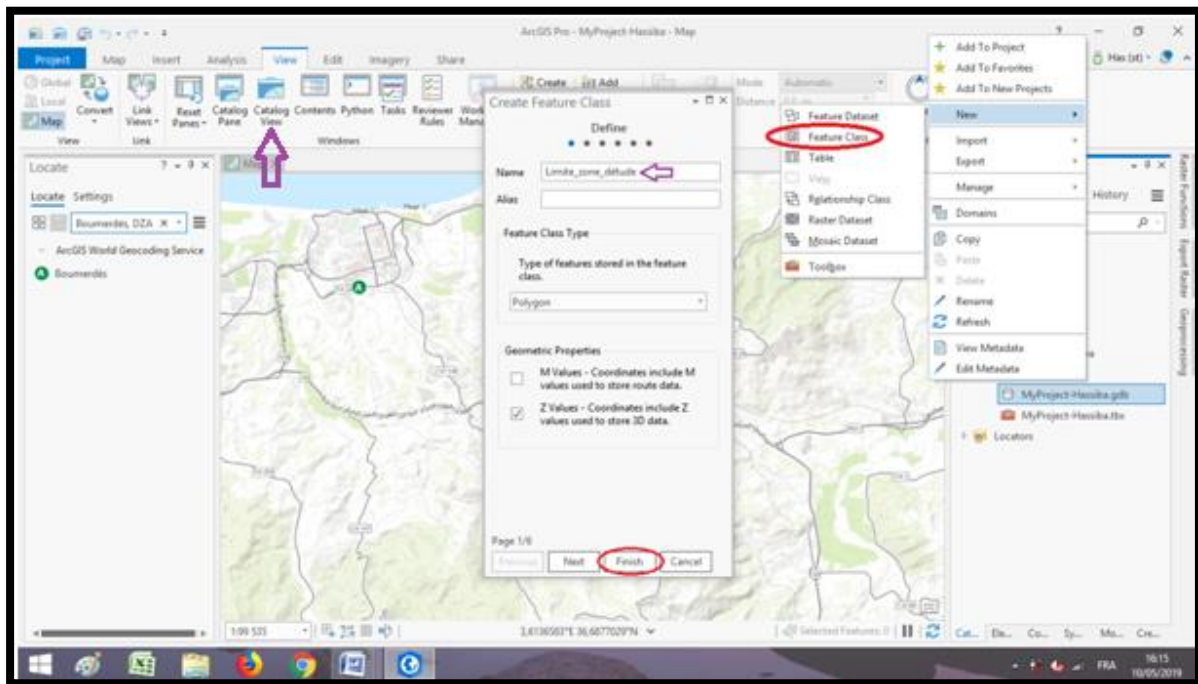
A l'ouverture du projet, une carte de Boumerdès apparaît.



**Figure 10 : Localisation de Boumerdès**

**Délimiter la zone d'étude :**

- 1- Cliquer sur View à partir du ruban après cliquer sur Catalog Pane.
- 2- Aller vers géodatabase à partir de « Folders ».
- 3- Cliquer droit sur la géodatabase et choisir « new feature class » et le type polygon et le renommer « Limite\_zone\_d'étude » et cliquer sur Finish « Finir ».



**Figure 11 : Délimitation de la zone d'étude**

A présent il s'agit de repérer la ville de Corso et la station d'épuration de Boumerdès :

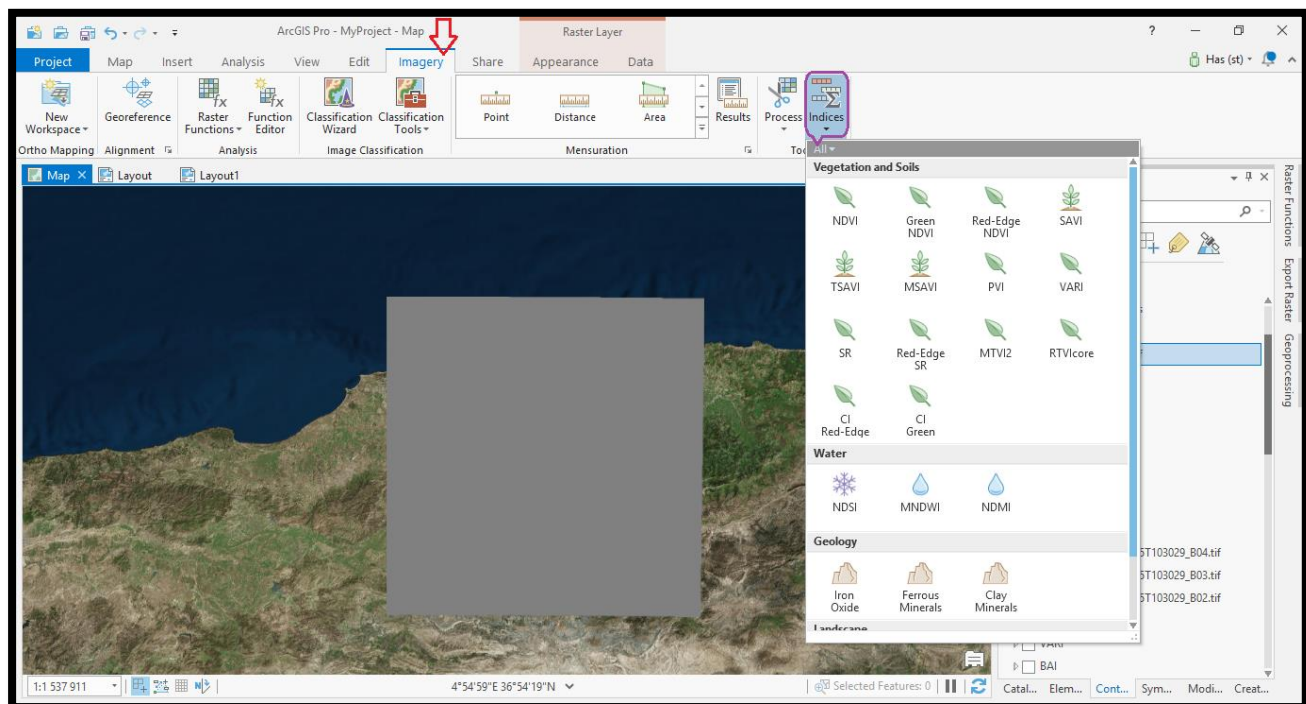
Il suffit de reprendre les mêmes étapes que celles déjà effectuées pour la limite de la zone d'étude. Seulement cette fois-ci le type point est choisit. Ils sont ajoutés à la carte en cliquant sur chaque élément puis un clique gauche sur « Add to current map ».

Enfin, les points sont placés et le polygone est tracé sur la carte. Ce qui abouti à la carte suivante:



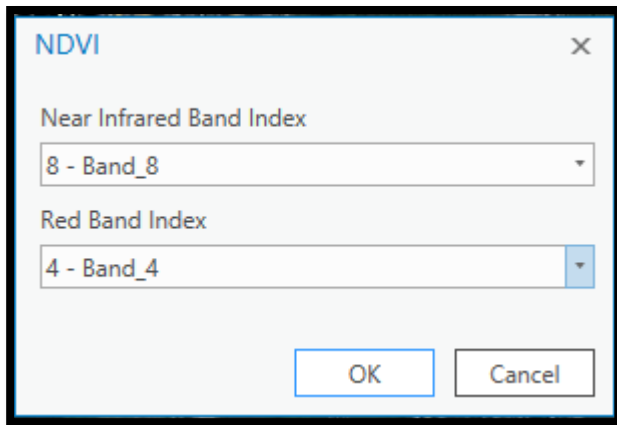
**Figure 12 : Carte de la zone d'étude**

L'introduction de la bande multispectrale, s'effectue en cliquant sur « Imagery » et par un choix d'« Indices ». La fenêtre ci-dessous est obtenue.



**Figure 13 : Calcul des indices de végétation**

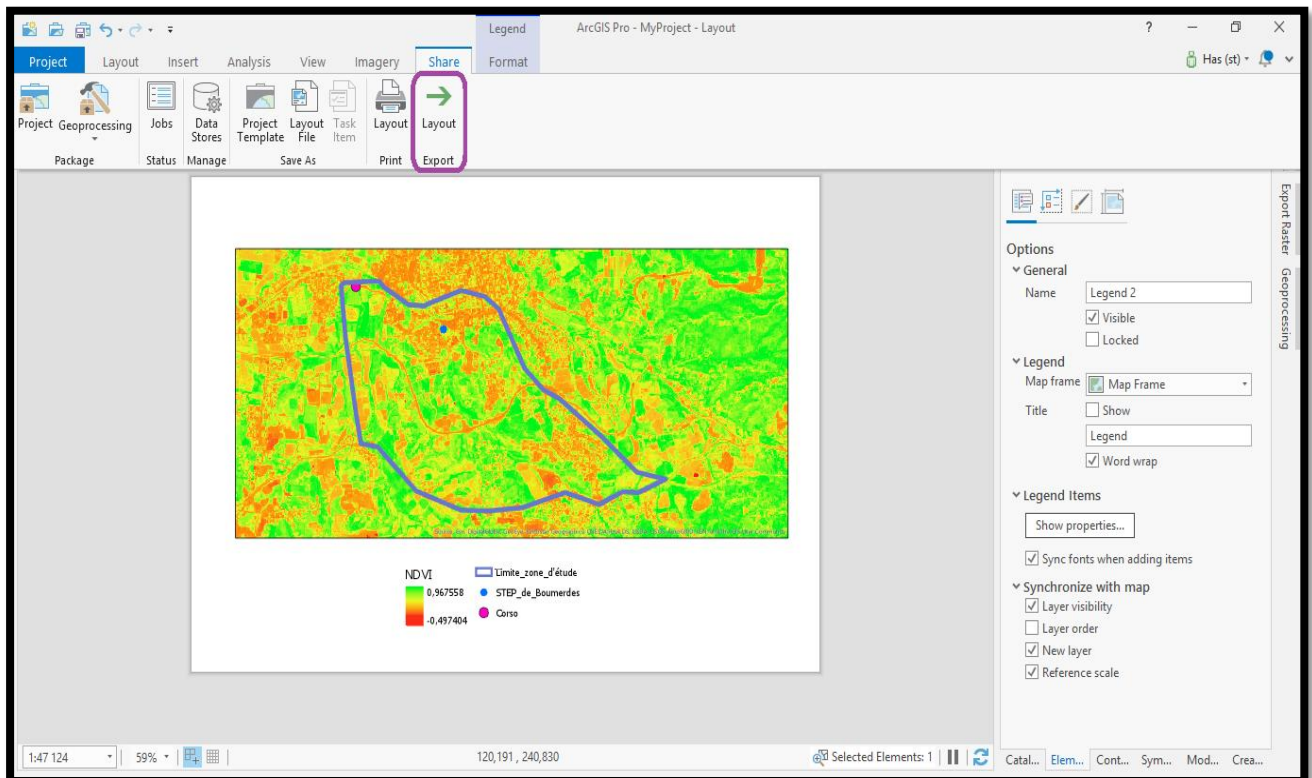
Un clique est effectué sur l'indice à calculer, puis un choix des bandes nécessaires est fait pour le calcul de cet indice.



**Figure 14 : Saisie des bandes**

Créer la carte de l'indice choisi :

- Cliquer sur « Insert » puis « New layout ».
- Choisir la carte de l'indice à partir de l'icône « Map frame » puis tracer le rectangle qui va contenir la carte.
- Pour ajouter la légende, sélectionne les éléments de la légende à partir de la fenêtre « Contents » de l'onglet « Map ».
- Cliquer sur « Insert » et puis sur légende et tracer le rectangle et la légende va apparaître.
- Enfin, cliquer sur l'onglet « Share » puis sur « Export Layout » pour sauvegarder la carte dans la forme choisie.



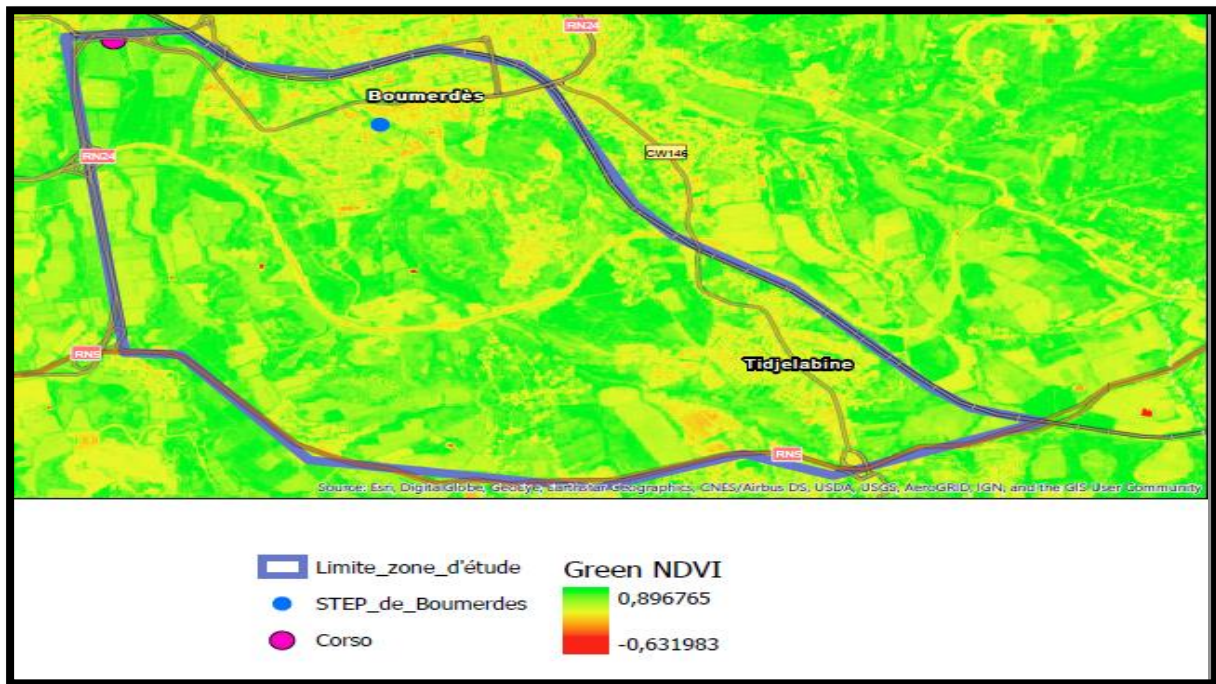
**Figure 15 : Création de la carte d'indice de végétation**





- Pour les zones urbaines, les valeurs de Green NDVI sont négatives ce qui est logique puisqu'il ne s'agit pas d'une zone agricole.

- Pour les zones agricoles, certaines ont des valeurs élevées positives de Green NDVI ce qui traduit un bon état nutritionnel d'azote et satisfaction d'eau et donc la disponibilité des ressources pour la photosynthèse. Alors que les autres zones qui ont des valeurs basses et parfois négatives se traduisent par un manque nutritionnel d'eau et d'azote et donc la photosynthèse est faible.



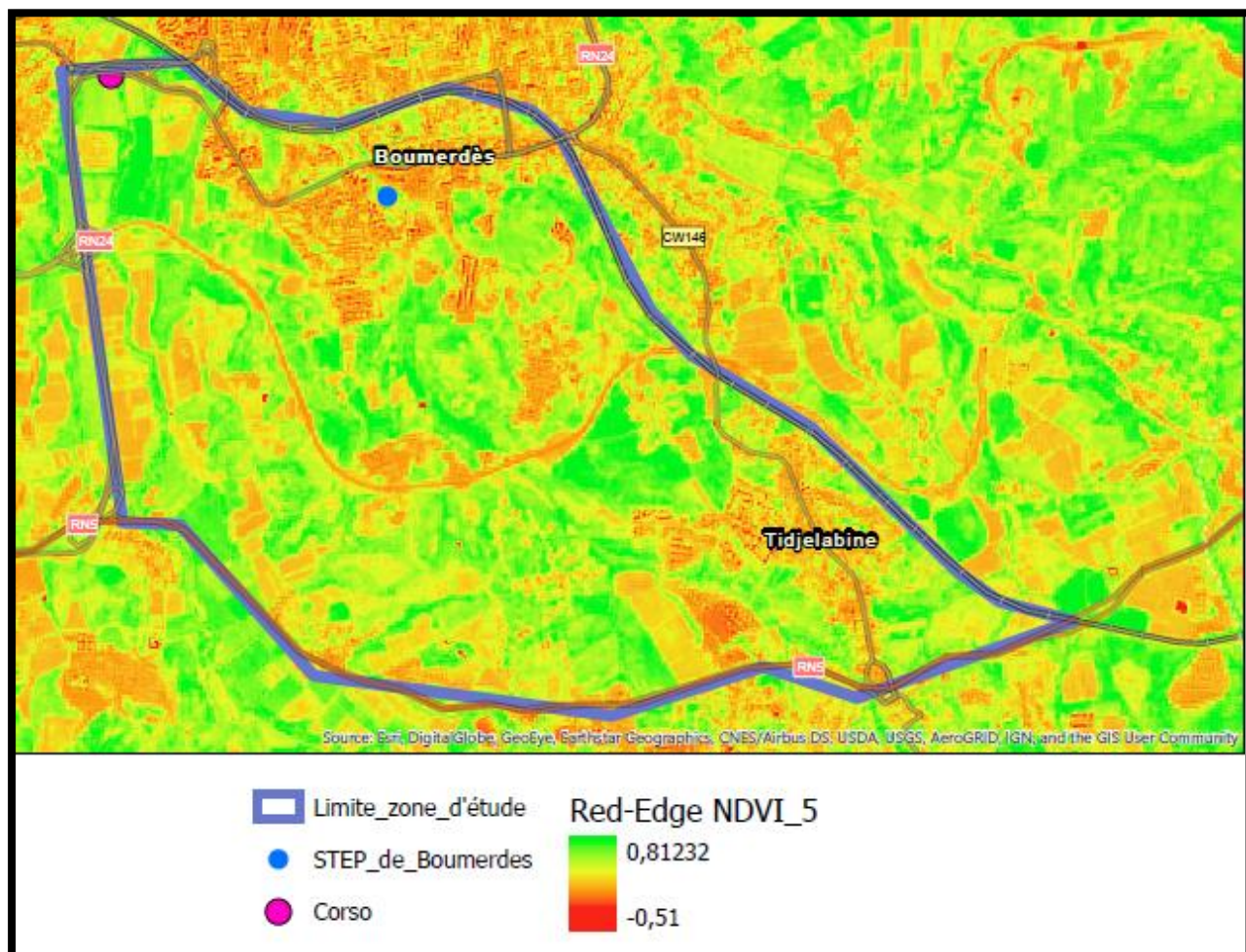
**Figure 17 : Répartition de Green NDVI dans la zone d'étude**

### 5.5.3 Red-Edge NDVI :

En comparant la répartition de Red-Edge NDVI et l'image satellitaire de notre zone d'étude, on remarque :

- Pour les zones urbaines, les valeurs de Red-Edge NDVI sont négatives ce qui est logique puisqu'il ne s'agit pas d'une zone agricole.

- Pour les zones agricoles, certaines ont des valeurs élevées positives de Red-Edge NDVI ce qui traduit un bon état nutritionnel d'azote et un bon état sanitaire de végétation. Alors que les autres zones qui ont des valeurs basses et parfois négatives se traduisent par un mauvais état nutritionnel d'azote et une mauvaise santé de la végétation.



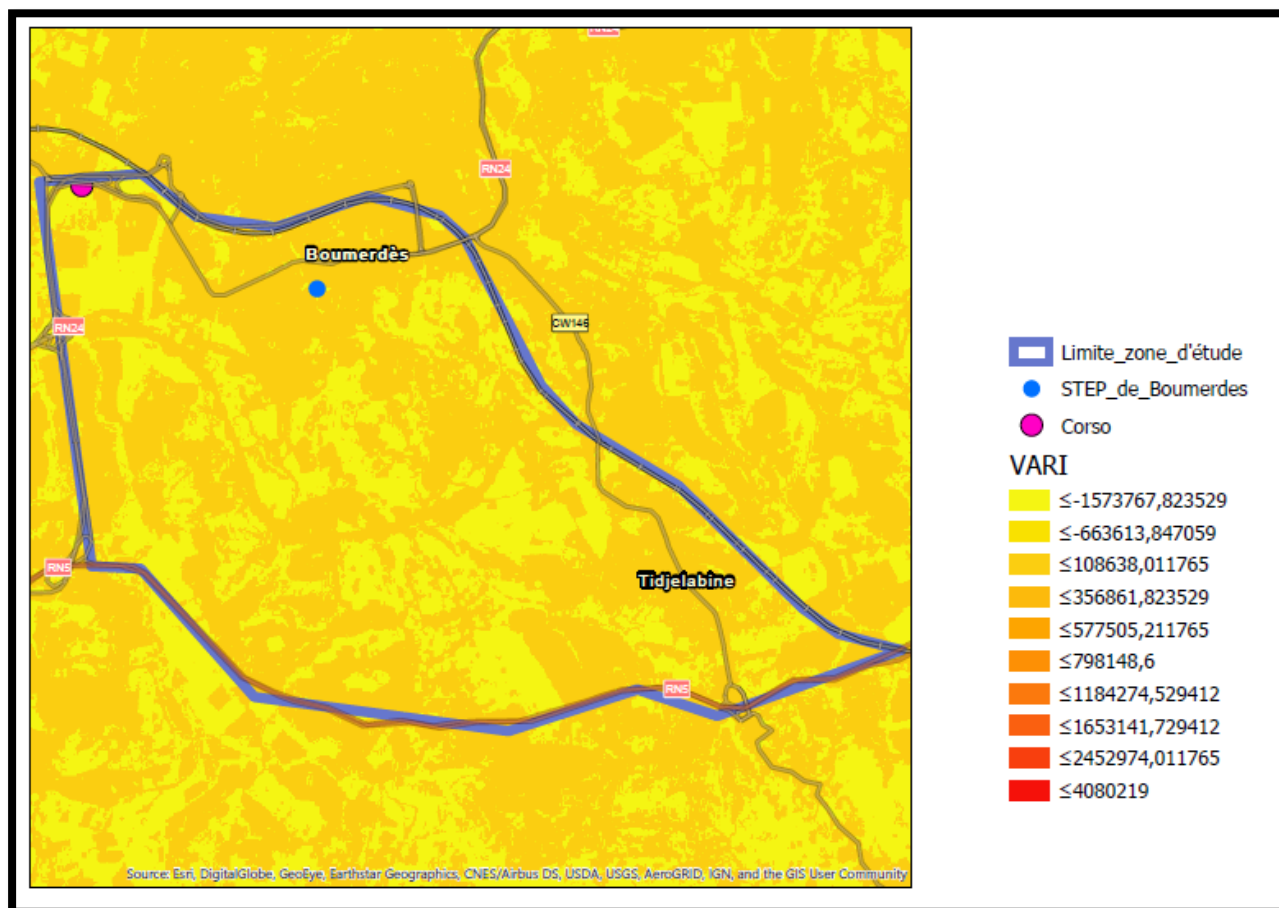
**Figure 18 : Répartition de Rededge-NDVI dans la zone d'étude**

#### 5.5.4 VARI :

En comparant la répartition de VARI et l'image satellitaire de notre zone d'étude, on remarque :

- Pour les zones urbaines, VARI prend des valeurs faibles.
- Pour les zones agricoles, certaines prennent des valeurs élevées ce qui veut dire c'est une zone où il existe une végétation qui a un bon état nutritionnel et certaines prennent des valeurs faibles ce qui signifie une végétation qui souffre d'un stress.

L'une des points forts de cet indice est qu'il est moins sensible aux conditions atmosphériques et il est sensible à la fraction de végétation. Mais d'un autre côté, il ne nous donne pas des informations concernant l'état sanitaire ou nutritionnel de la végétation.

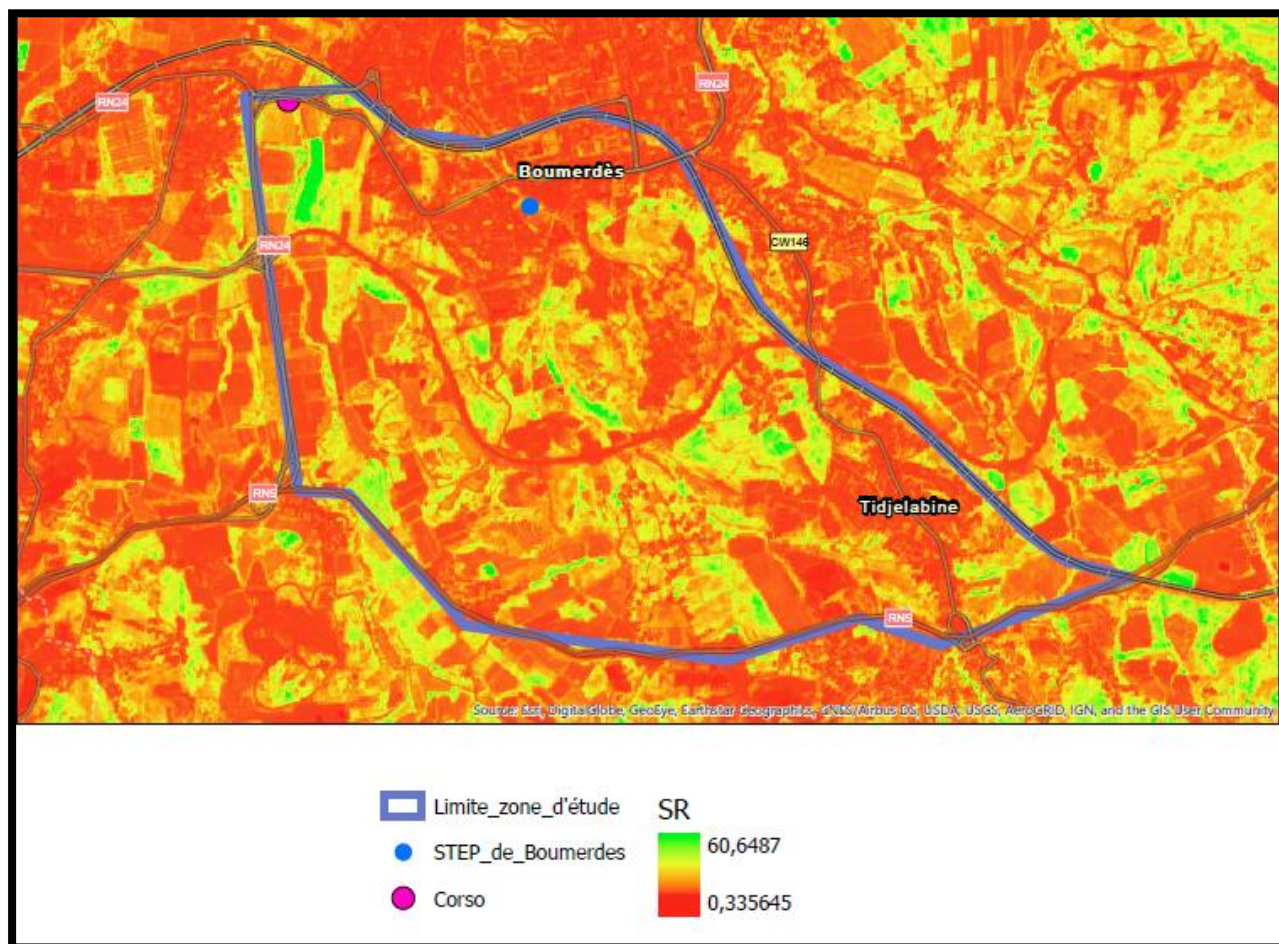


**Figure 19 : Répartition de VARI dans la zone d'étude**

### 5.5.5 SR :

En comparant la répartition de SR et l'image satellitaire de la zone d'étude :

- Pour les zones urbaines, on remarque des valeurs négatives de SR à cause de l'inexistence de végétation.
- Pour les zones agricoles, certaines terres ont des valeurs élevées de SR qui signifie une surface foliaire importante alors que d'autres terres n'ont pas ce qui se traduit par une faible surface foliaire.

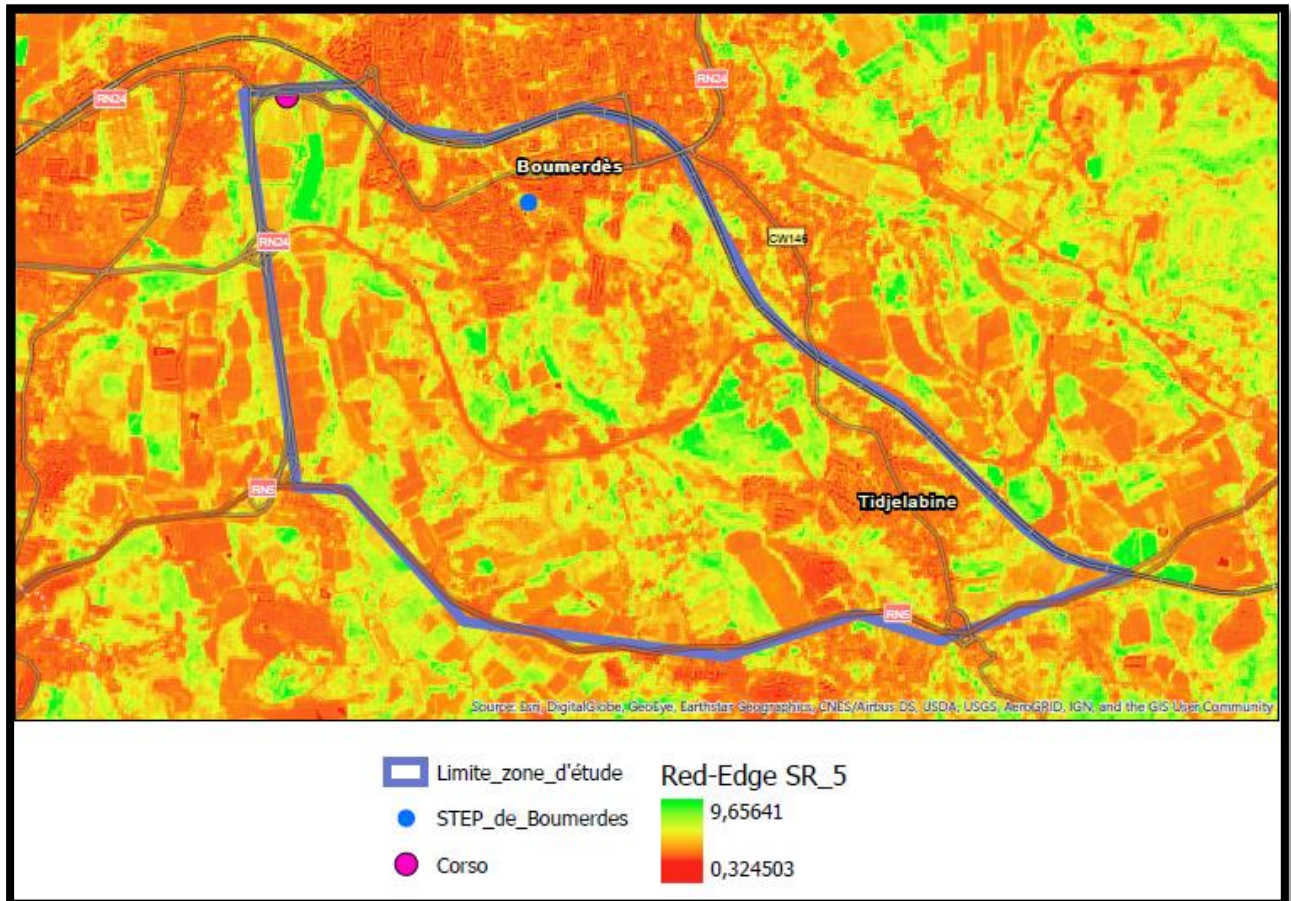


**Figure 20 : Répartition de SR dans la zone d'étude**

### 5.5.6 Red-Edge SR :

- Pour les zones urbaines, les valeurs de Red-Edge SR sont faibles à cause de l'inexistence de végétation.

- Pour les zones agricoles, celles qui ont des valeurs élevées de Red-Edge SR ce qui signifie une végétation saine. Surtout celles qui ont Rededge SR entre 1 et 10. Pour celles qui ont des valeurs plus faibles, cela veut dire une végétation stressée.

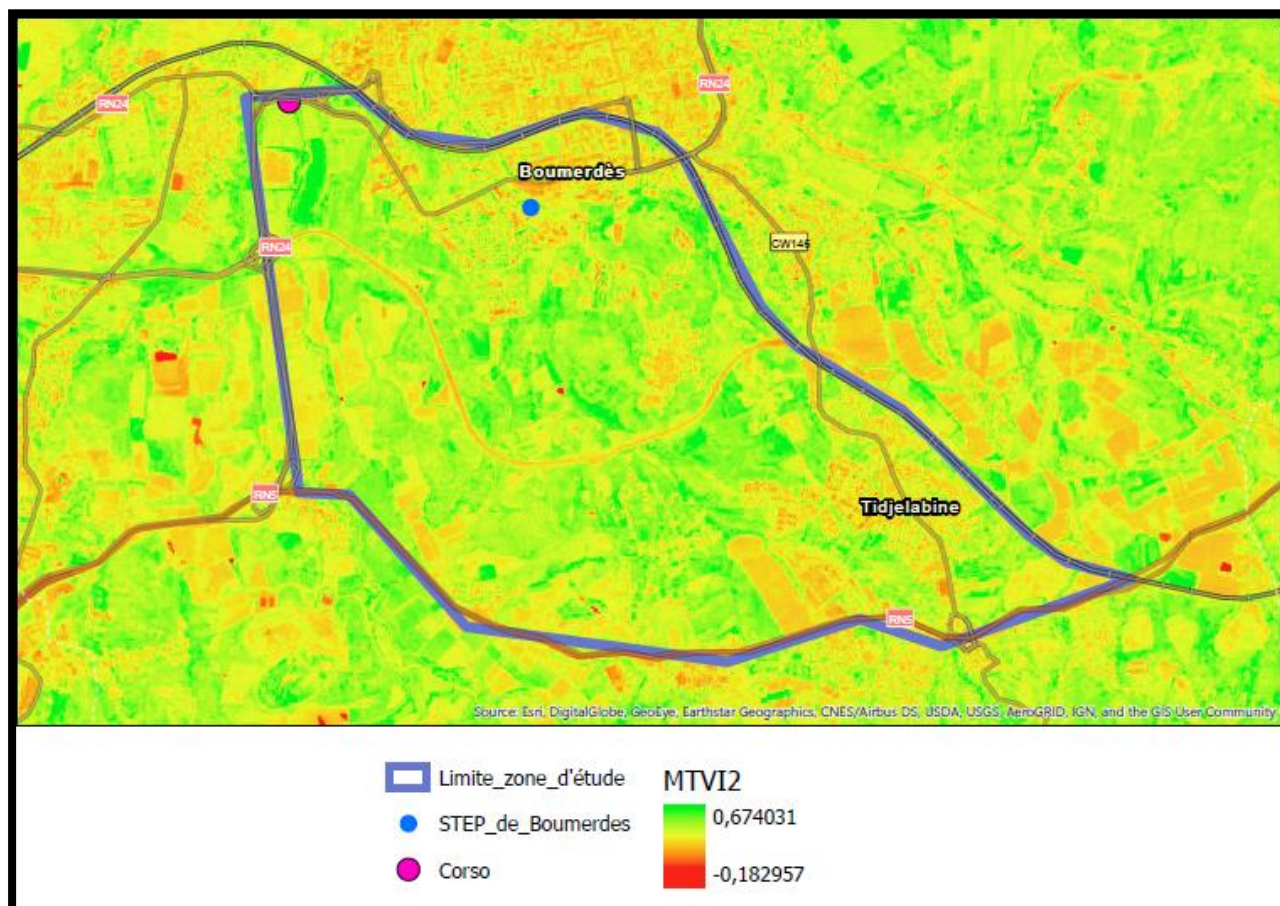


**Figure 21 : Répartition de Rededge SR dans la zone d'étude**

### 5.5.7 MTVI2 :

- Pour les zones urbaines, MTVI 2 prend des valeurs négatives à cause de l'absence de la végétation et donc de Chlorophylle.

- Pour les zones agricoles, certaines ont des valeurs négatives qui veut dire manque ou absence de Chlorophylle et certaines qui ont des valeurs positives ce qui prouve l'existence de Chlorophylle d'une façon suffisante dans la végétation.



**Figure 22 : Répartition de MTVI 2 dans la zone d'étude**

### 5.5.8 RTVICore :

- Pour les zones urbaines, RTVICore prend des valeurs négatives à cause de l'inexistence de surface foliaire et de biomasse.
- Pour les zones agricoles, certaines ont des valeurs négatives. Ce sont celles qui souffrent d'un manque ou de l'inexistence de la biomasse et de la surface foliaire. Alors que ceux qui ont des valeurs positives c'est ceux qui ont une surface foliaire et biomasse importantes.

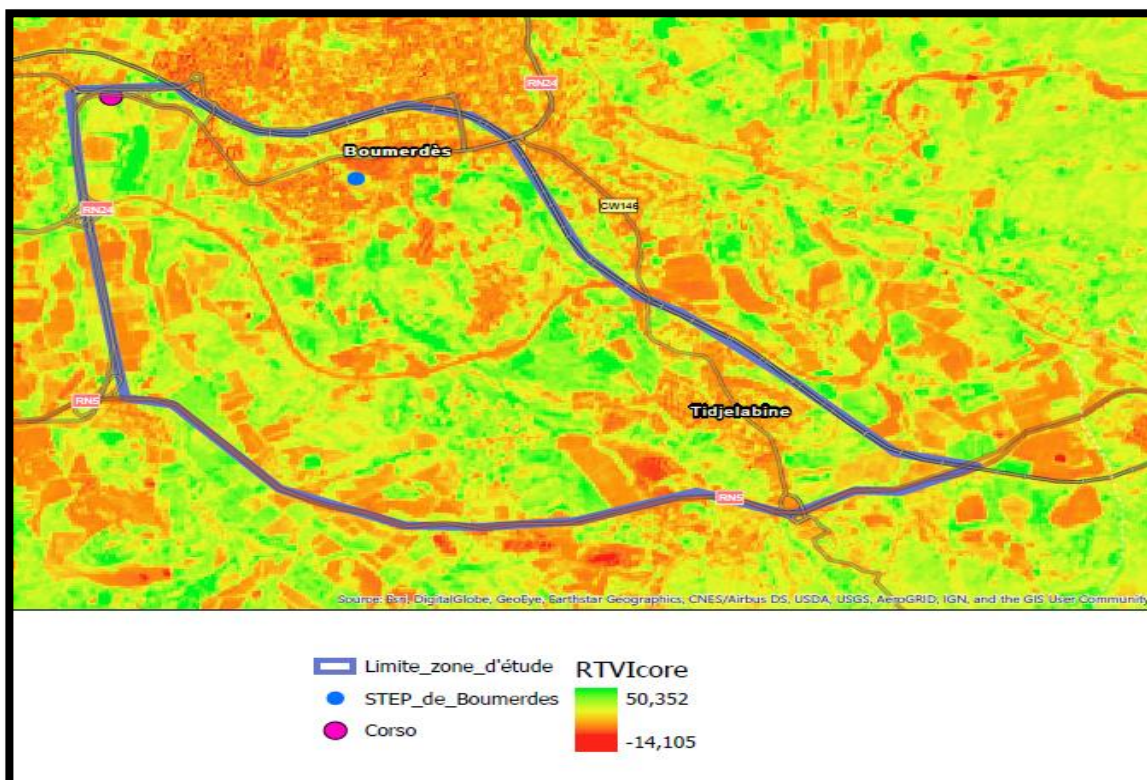


Figure 23 : Répartition de RTVICore dans la zone d'étude

### 5.5.9 CI Rededge et CI Green :

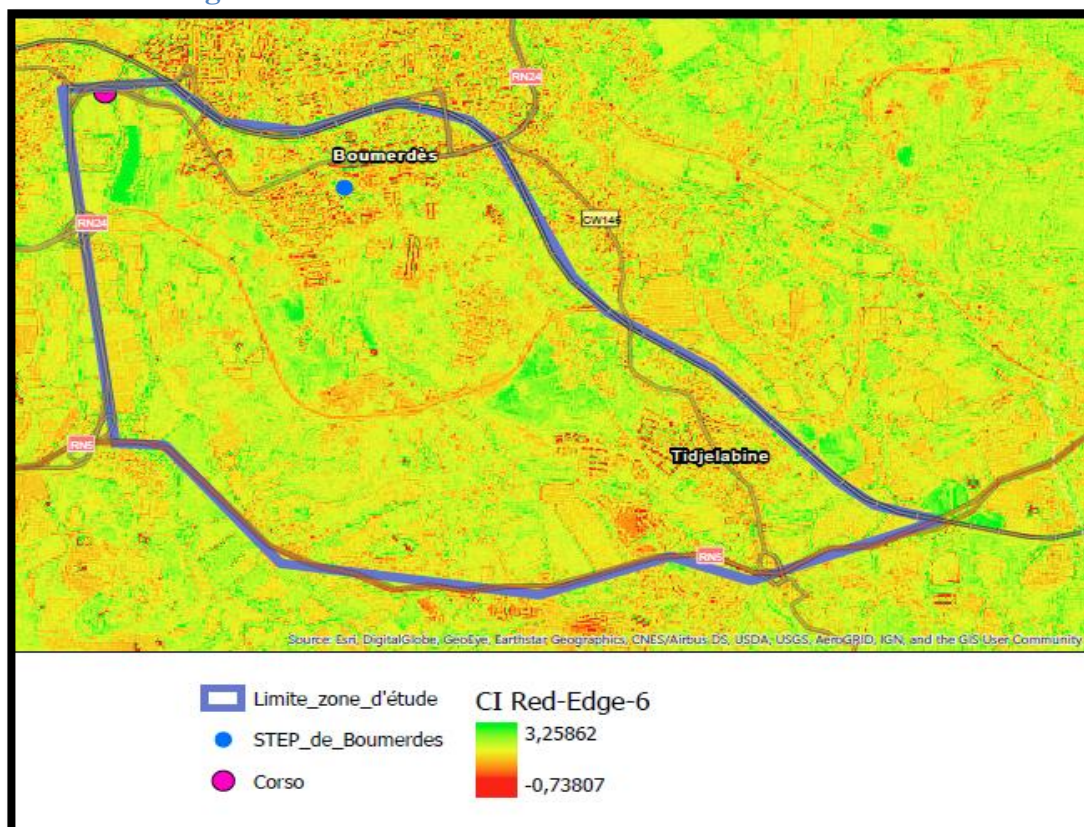
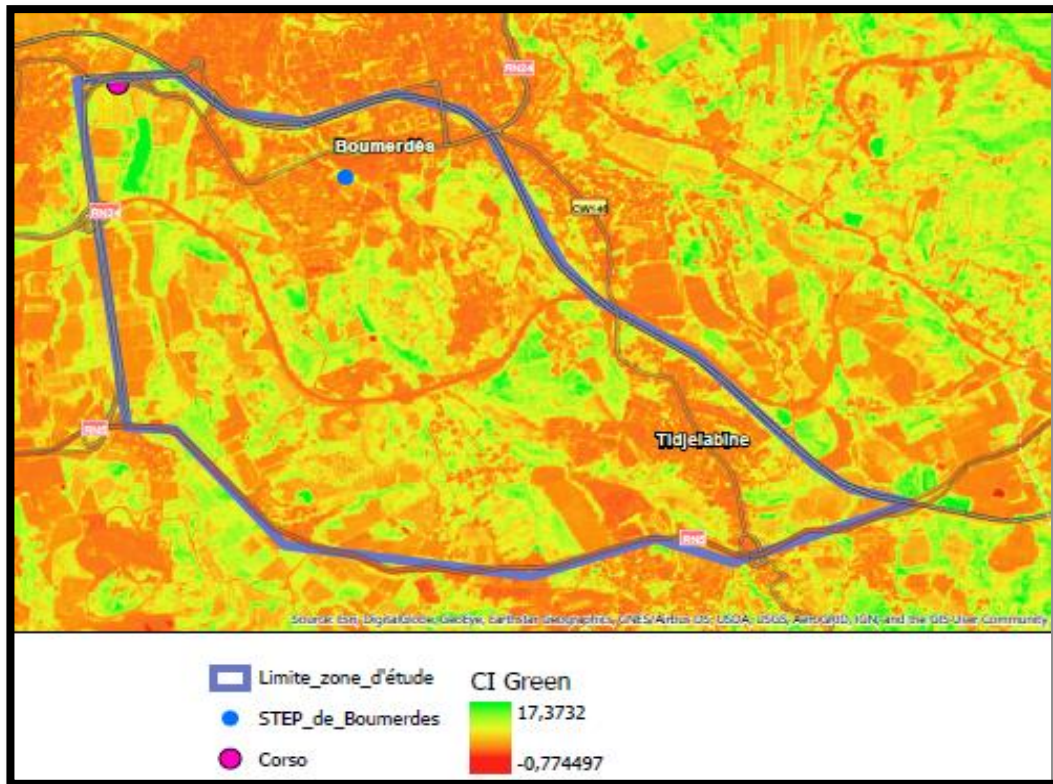


Figure 24 : Répartition de CI-Rededge dans la zone d'étude





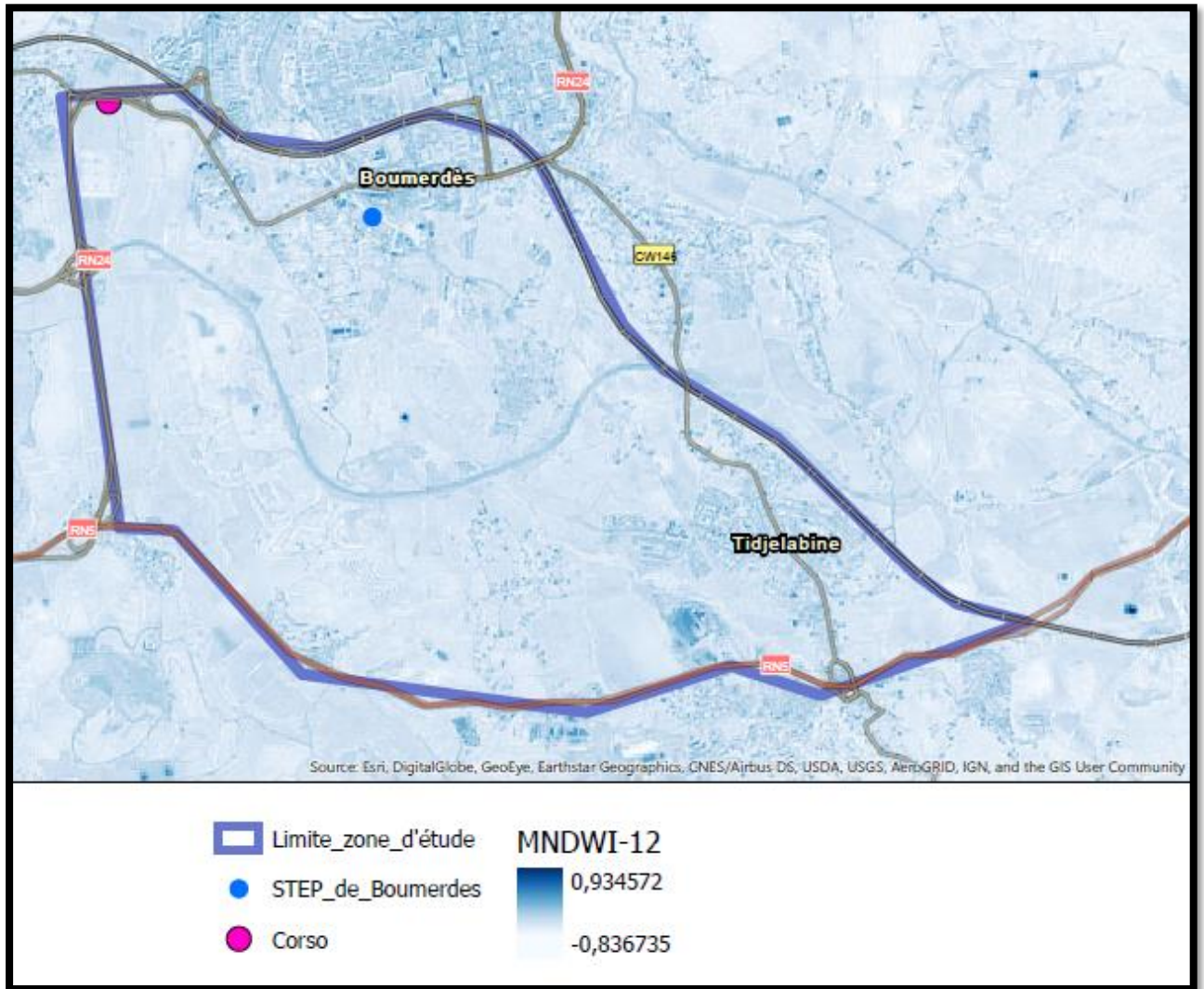
**Figure 25 : Répartition de CI-Green dans la zone d'étude**

- Pour les zones urbaines, CI Rededge et CI Green prennent des valeurs négatives à cause de l'inexistence de végétation et donc de Chlorophylle.

- Pour les zones agricoles, celles qui ont des valeurs négatives sont celles qui souffrent d'un manque de Chlorophylle. Alors que celles qui ont des valeurs positives, ce sont celles qui ont une quantité importante de Chlorophylle.

#### 5.5.10MNDWI :

Les valeurs de MNDWI sont négatives ou positives très proche de zéro dans toute la zone d'étude ce qui traduit l'inexistence des cours d'eau, ce qui assure une autre fois la nécessité d'utilisation des eaux usées épurées de la STEP de Boumerdès.



**Figure 26 : Répartition de MNDWI dans la zone d'étude**

### 5.5.11 NDMI :

L'indice NDMI est bien corrélé au taux d'humidité dans le sol et permet la surveillance de risque de sécheresse, donc on déduit l'existence des zones qui ont accès à assez d'eau alors que d'autres souffrent d'un manque d'eau ce qui nécessite une irrigation.

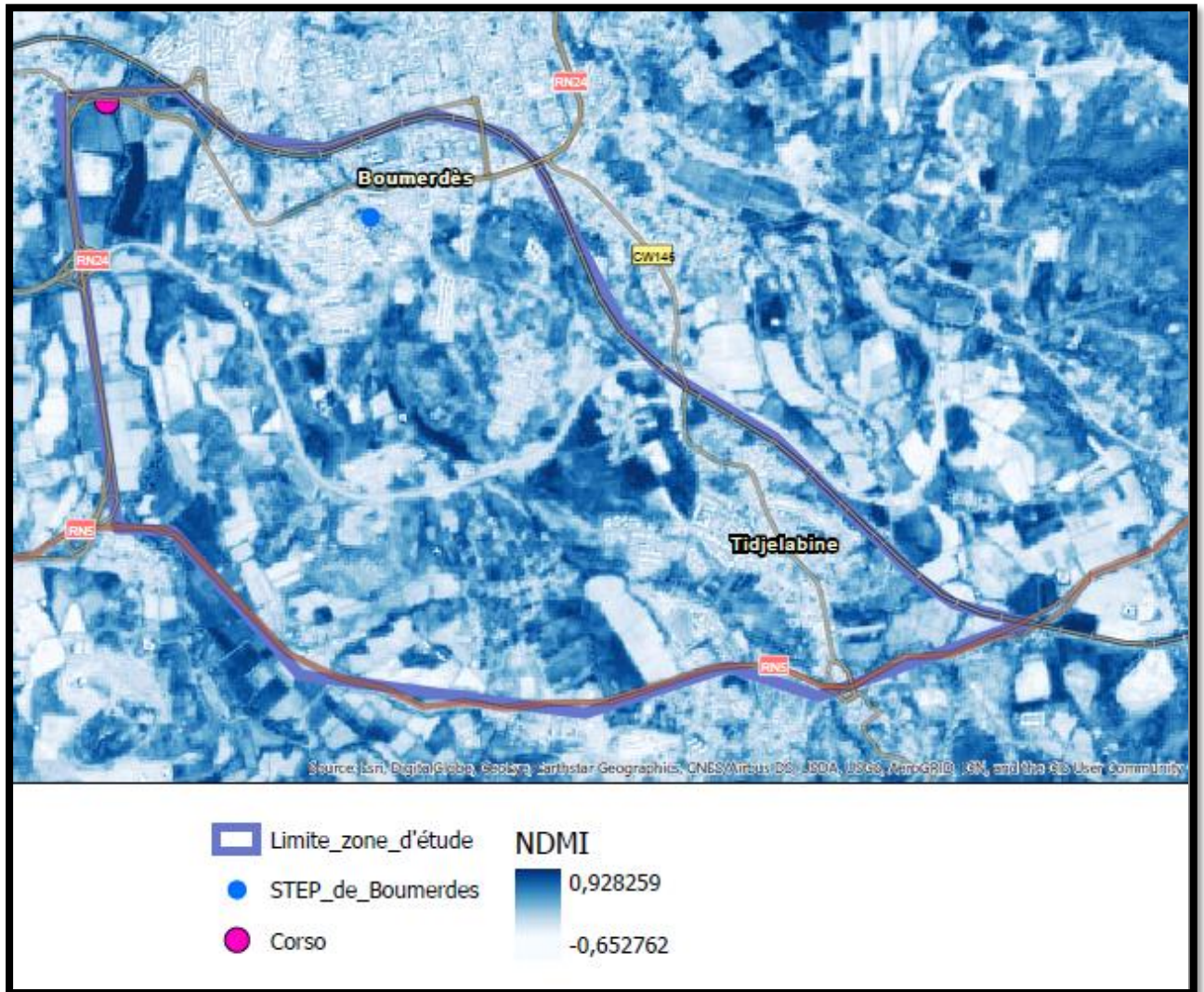
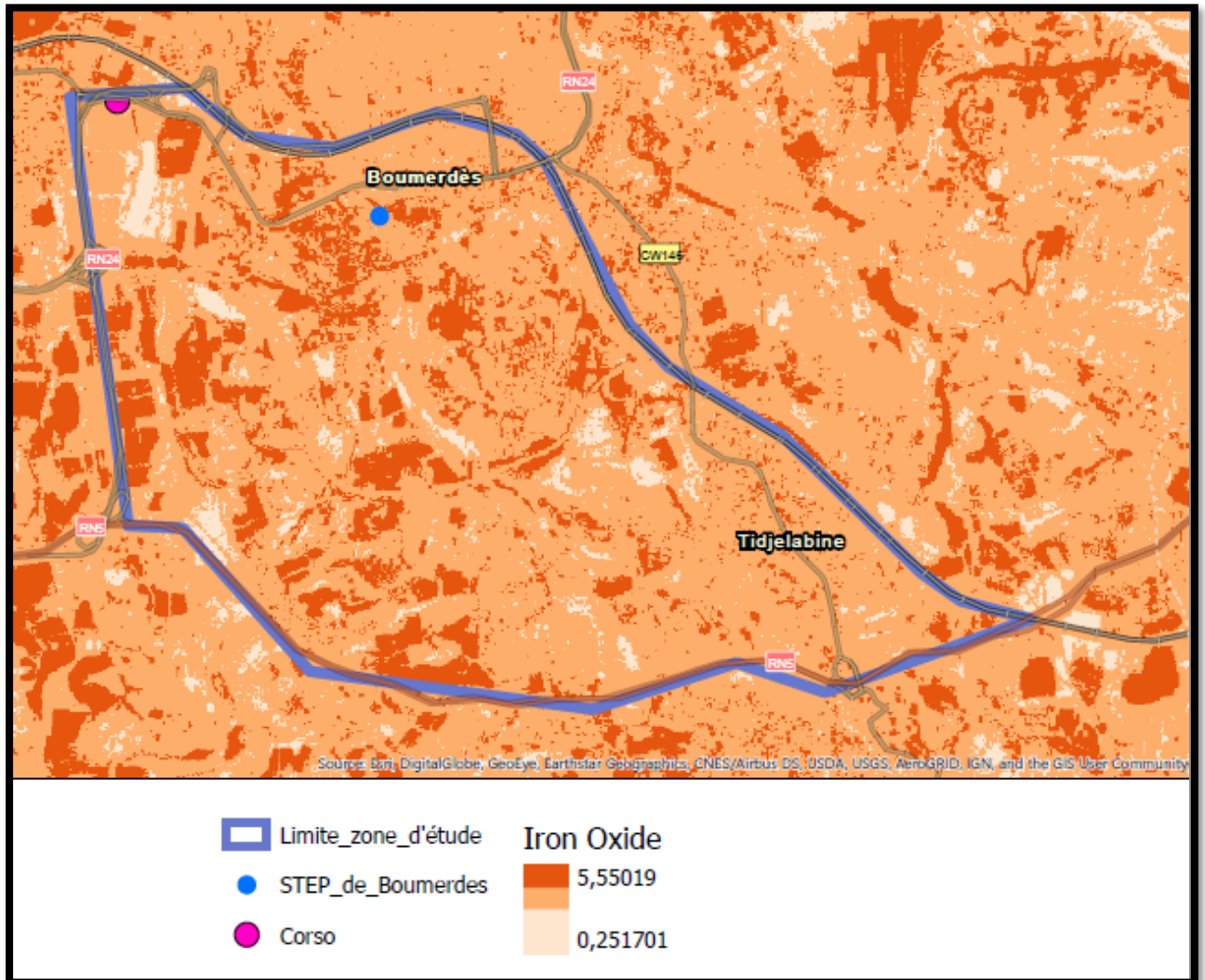


Figure 27 : Répartition de NDMI dans la zone d'étude

### 5.5.12 Iron oxide :

On remarque la disponibilité d'oxyde de fer dans le sol dans la plupart des régions de notre zone d'étude sauf quelques unes, donc certaines régions agricoles ont besoin d'apport de fer alors que d'autres ont assez de fer.



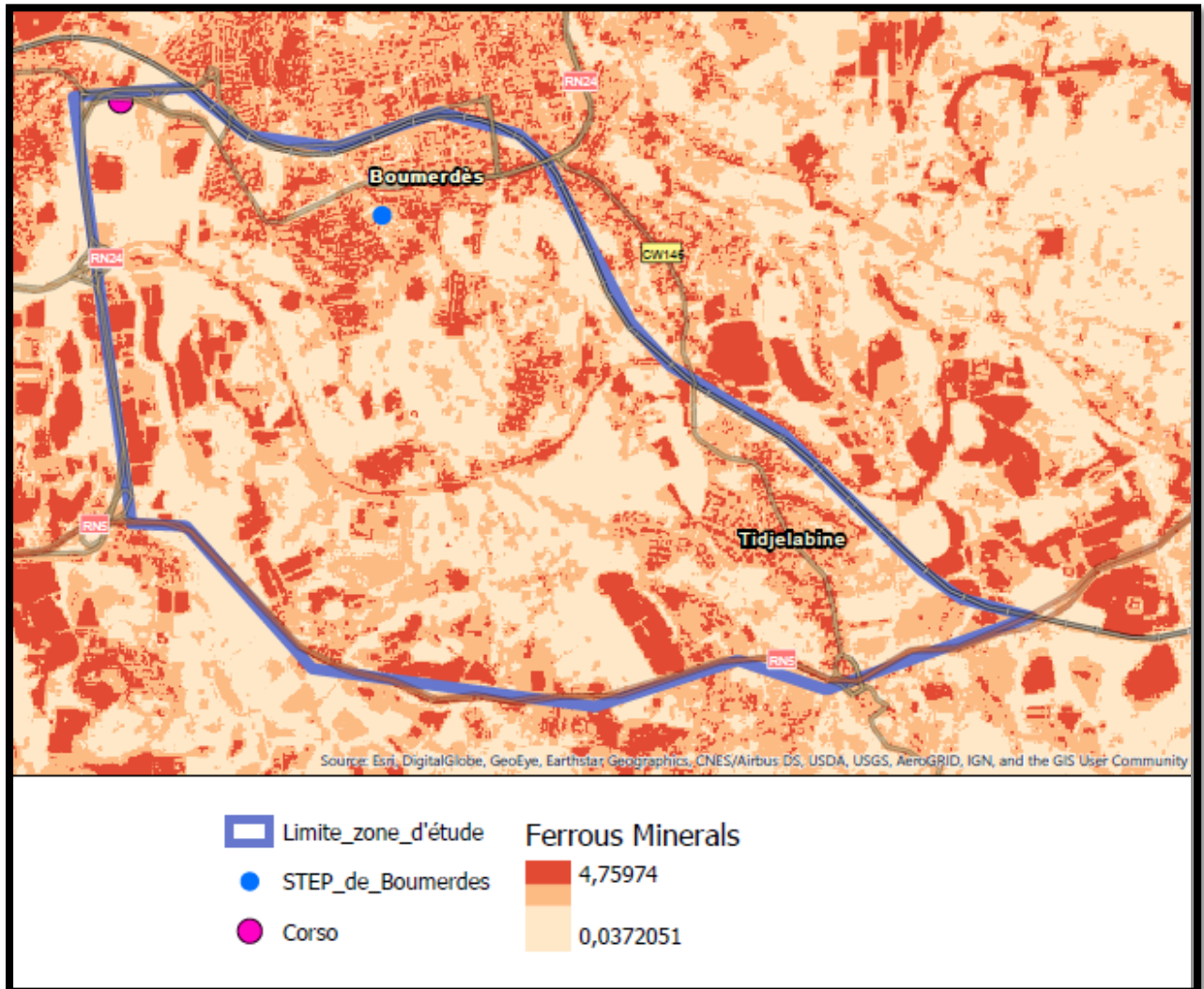
**Figure 28 : Répartition d'oxyde de fer dans la zone d'étude**

### 5.5.13 Ferrous Minerals :

D'abord, on a remarqué une ressemblance entre la répartition des minéraux ferreux et celle de NDVI, NDVI-Rededge et RTVICore. On déduit donc qu'il y a une relation entre ces 4 indices.

- Pour les zones qui ont proportion moyenne de fer, elles ont un faible NDVI, NDVI-rededge et RTVICore « manque d'azote, mauvais état sanitaire de la végétation et faible chlorophylle » donc il y a un excès de fer qui a bloqué l'assimilation des autres nutriments donc on doit diminuer par solubilité le taux de fer.

- Pour les zones agricoles d'une valeur faible de fer, ce sont celles qui ont des valeurs importantes de NDVI, NDVI-rededge et RTVICore. Cela entraîne bon état nutritionnel d'azote, végétation saine et assez de chlorophylle.



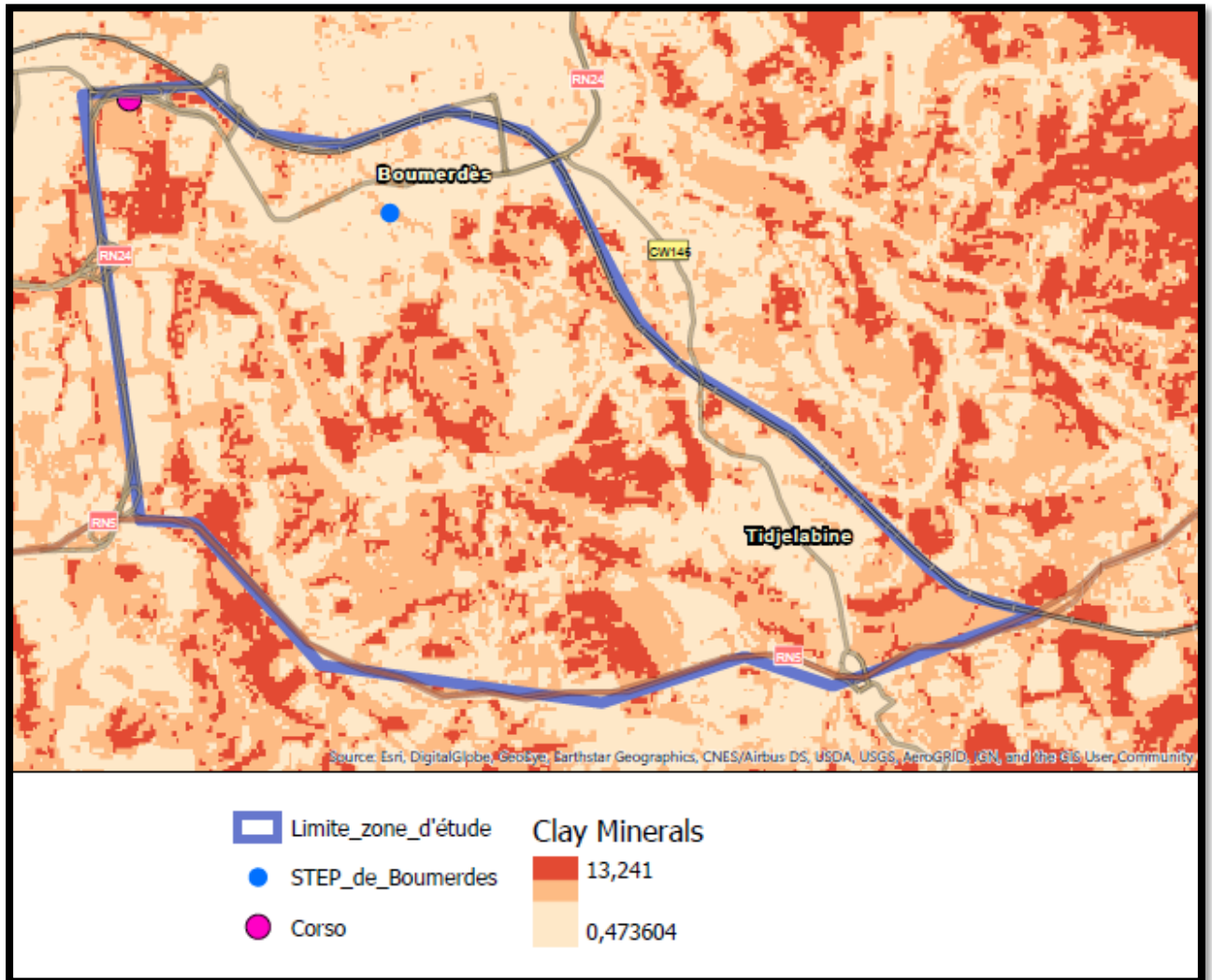
**Figure 29 : Répartition des minéraux ferreux dans la zone d'étude**

#### 5.5.14 Clay minerals (Minéraux argileux) :

- Pour les zones urbaines, on remarque qu'elles sont pauvres en argile, ce qui diminue les risques de gonflement et la rétraction du sol qui peut causer la destruction des bâtiments.

-Pour les zones agricoles, certaines sont riches en argile et donc retiennent bien l'eau. Mais aussi, elles sont riches en éléments fertilisants et donc ne nécessitent pas une fertilisation ou une irrigation intense. Néanmoins, étant donné la difficulté à les travailler, elles nécessitent des entretiens pour aérer le sol et faciliter l'hydratation. Certaines sont pauvres en argile, et donc doivent être fertilisés.

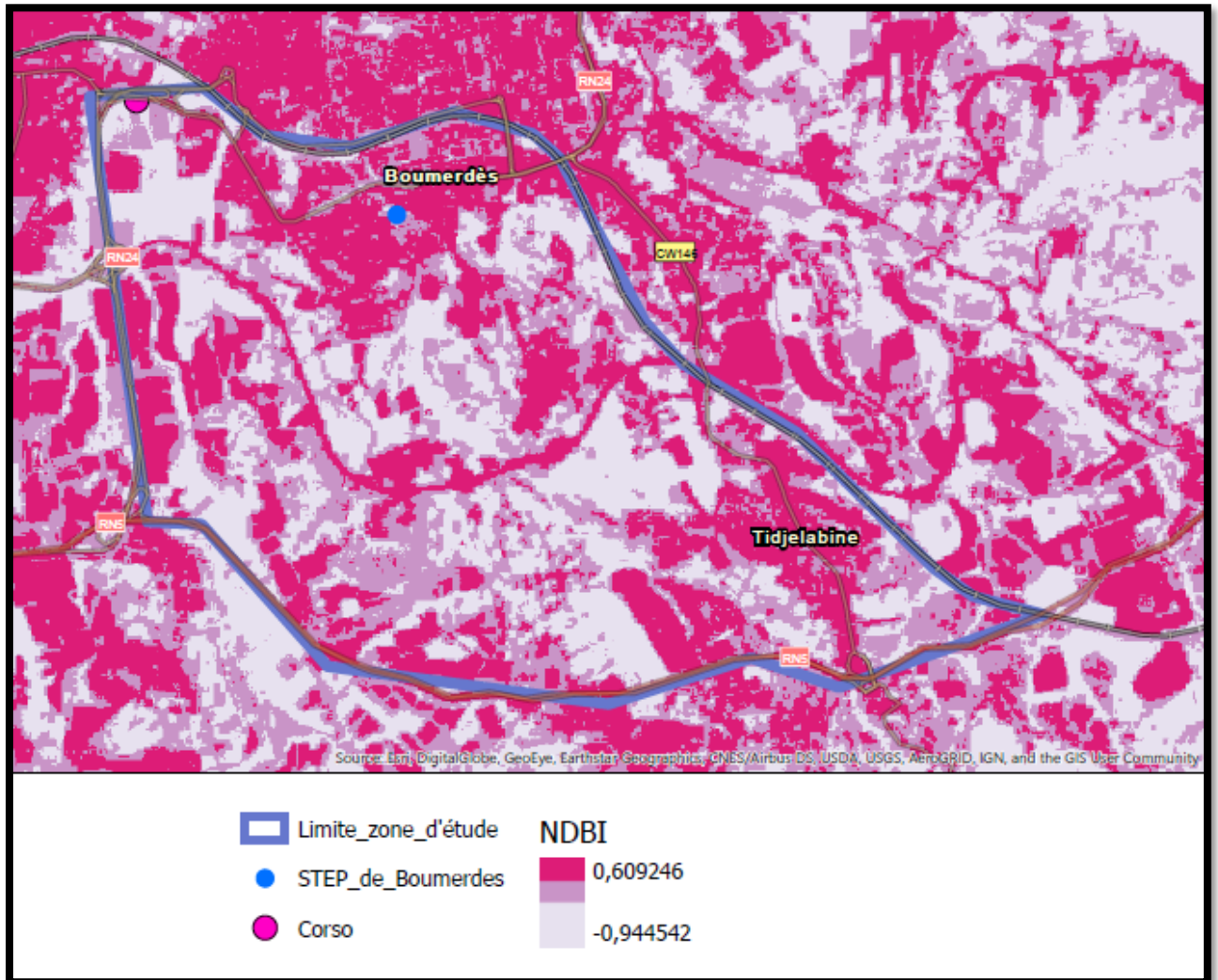
De plus, la connaissance de la teneur en argile du sol permet le choix des cultures adaptés à ce sol.



**Figure 30 : Répartition des minéraux argileux dans la zone d'étude**

### 5.5.15NDBI :

Cet indice permet de mettre en valeur les zones construites par l'homme donc les valeurs faibles présentent les zones agricoles saines. Mais les valeurs élevées présentent les zones urbaines et les zones agricoles qui souffrent d'un stress, une toxicité, ...etc donc cet indice ne permet pas une distinction définitive entre les zones agricoles stressées et les zones urbaines.

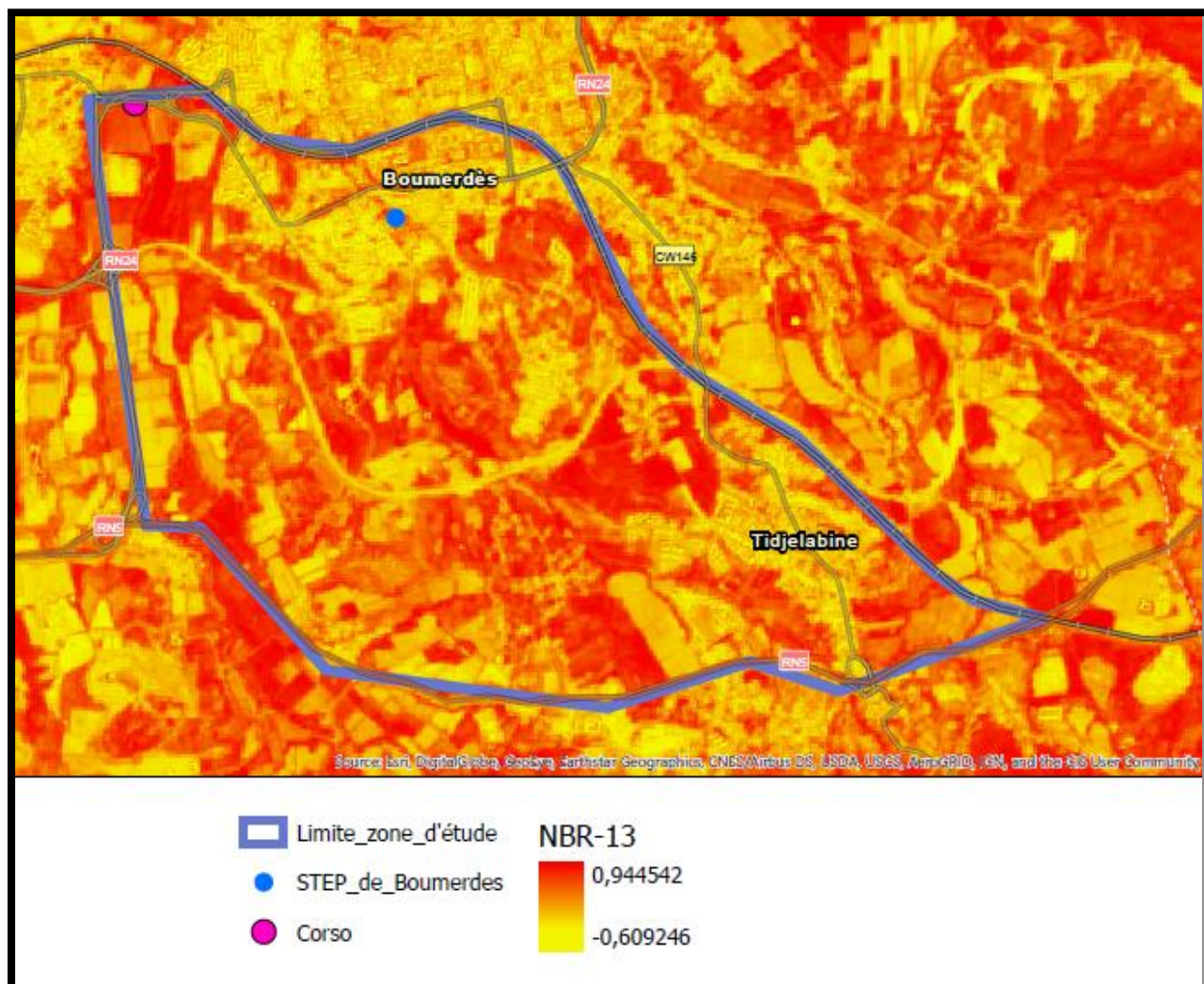


**Figure 31 : Répartition de NDBI dans la zone d'étude**

### 5.5.16NBR :

Une valeur de NBR élevée indique une végétation saine, tandis qu'une valeur basse indique un sol nu, des zones urbaines ou des zones récemment brûlées et puisque notre zone n'a pas subi un incendie donc c'est soit un sol nu ou zone urbaine.

Donc cet indice peut être utilisé même si la zone n'a pas subi un incendie et donc permet de déterminer la densité de la végétation.

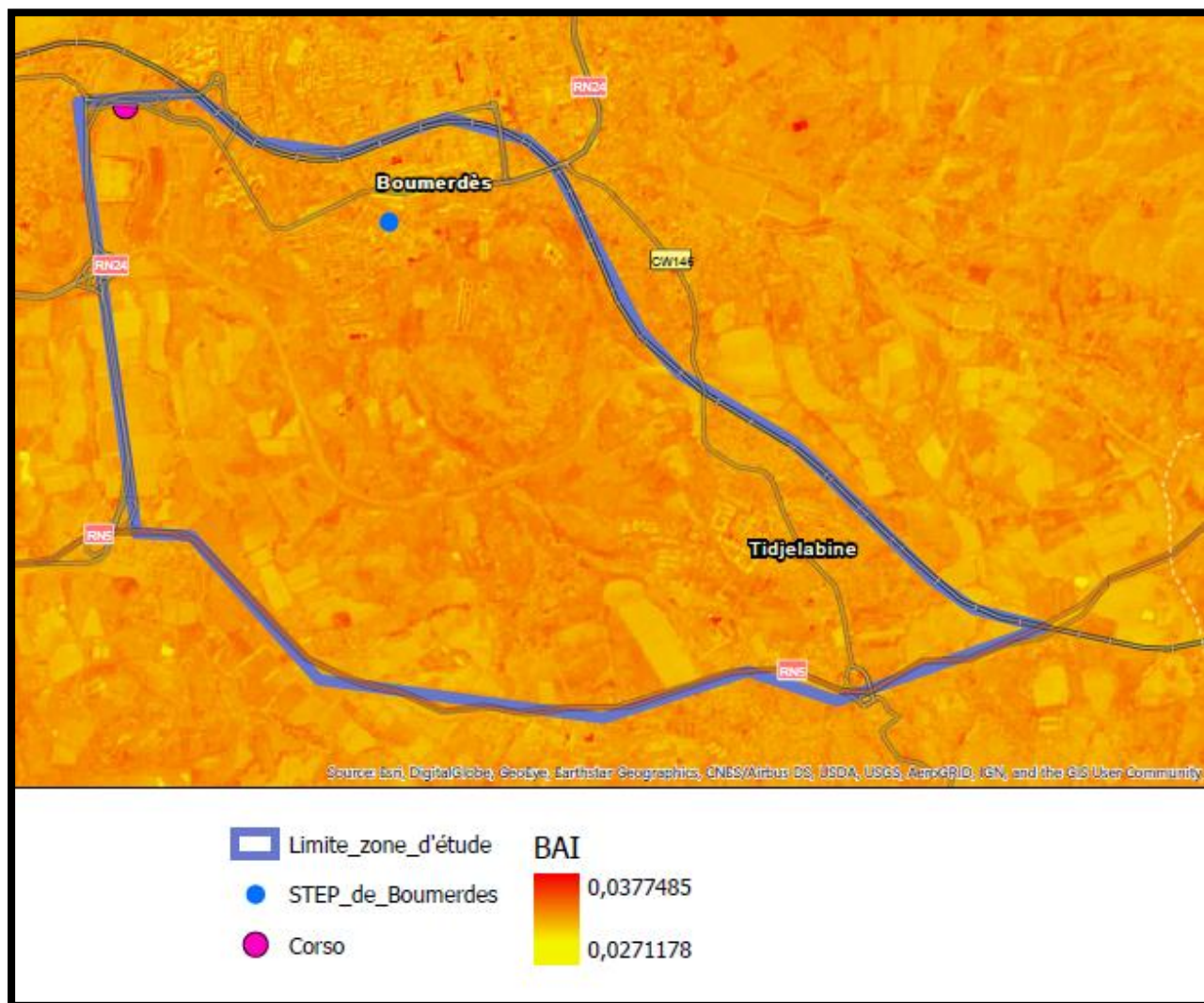


**Figure 32 : Répartition de NBR dans la zone d'étude**

### 5.5.17BAI :

Cet indice permet de désigner les zones touchées par le feu et dans notre cas il prend des valeurs faibles ce qui veut dire qu'il n'y avait pas un incendie dans notre zone d'étude et c'est vraiment le cas.

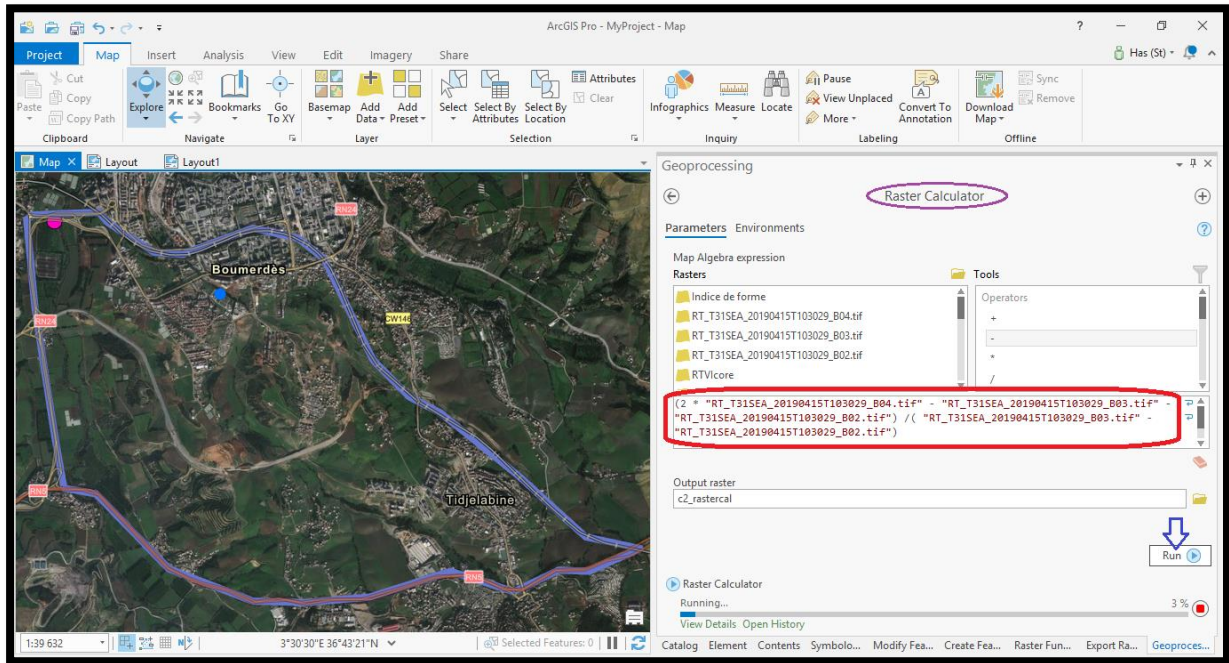




**Figure 33 : Répartition de BAI dans la zone d'étude**

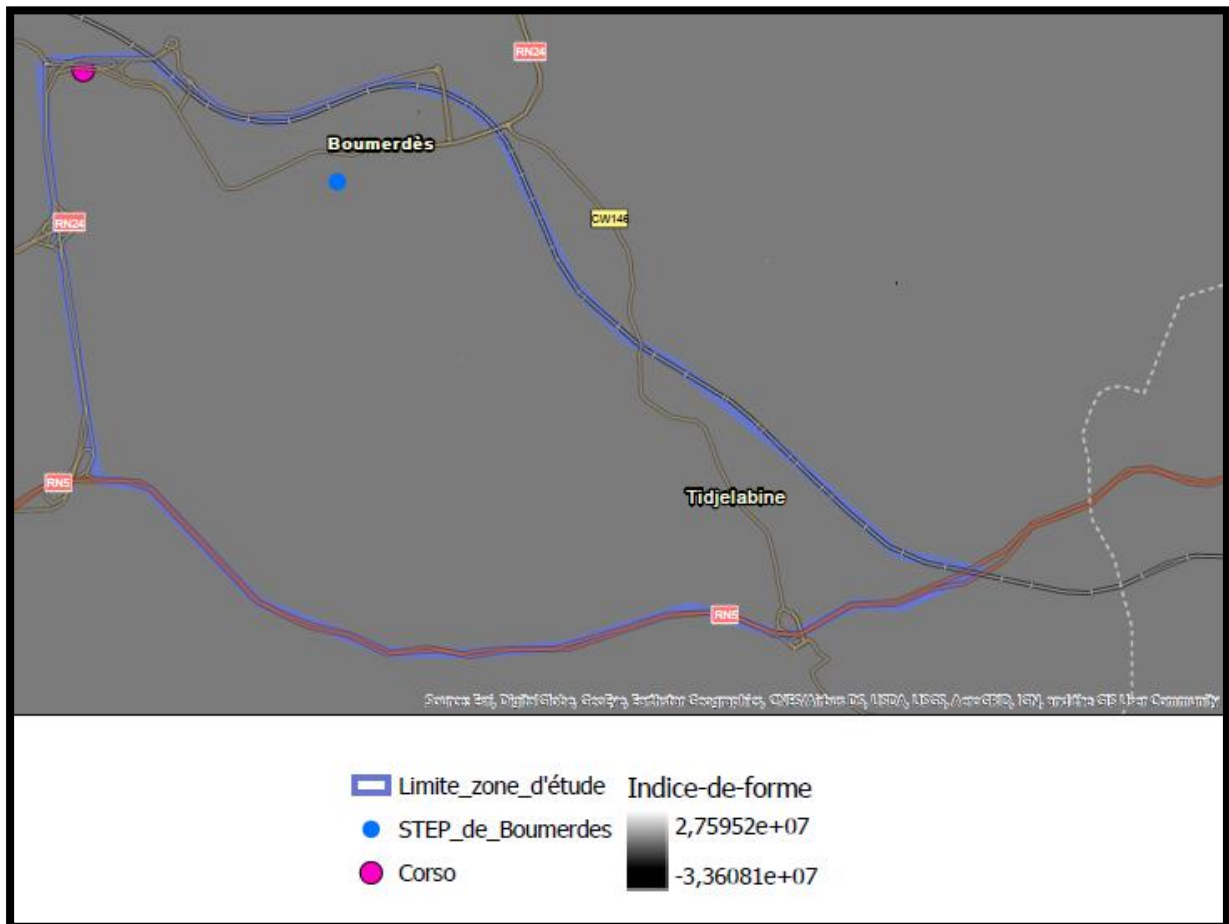
### 5.5.18 Indice de forme :

On a calculé l'indice de forme en utilisant « Raster Calculator » et les 3 bandes corrigées 'bleu, vert et rouge'.



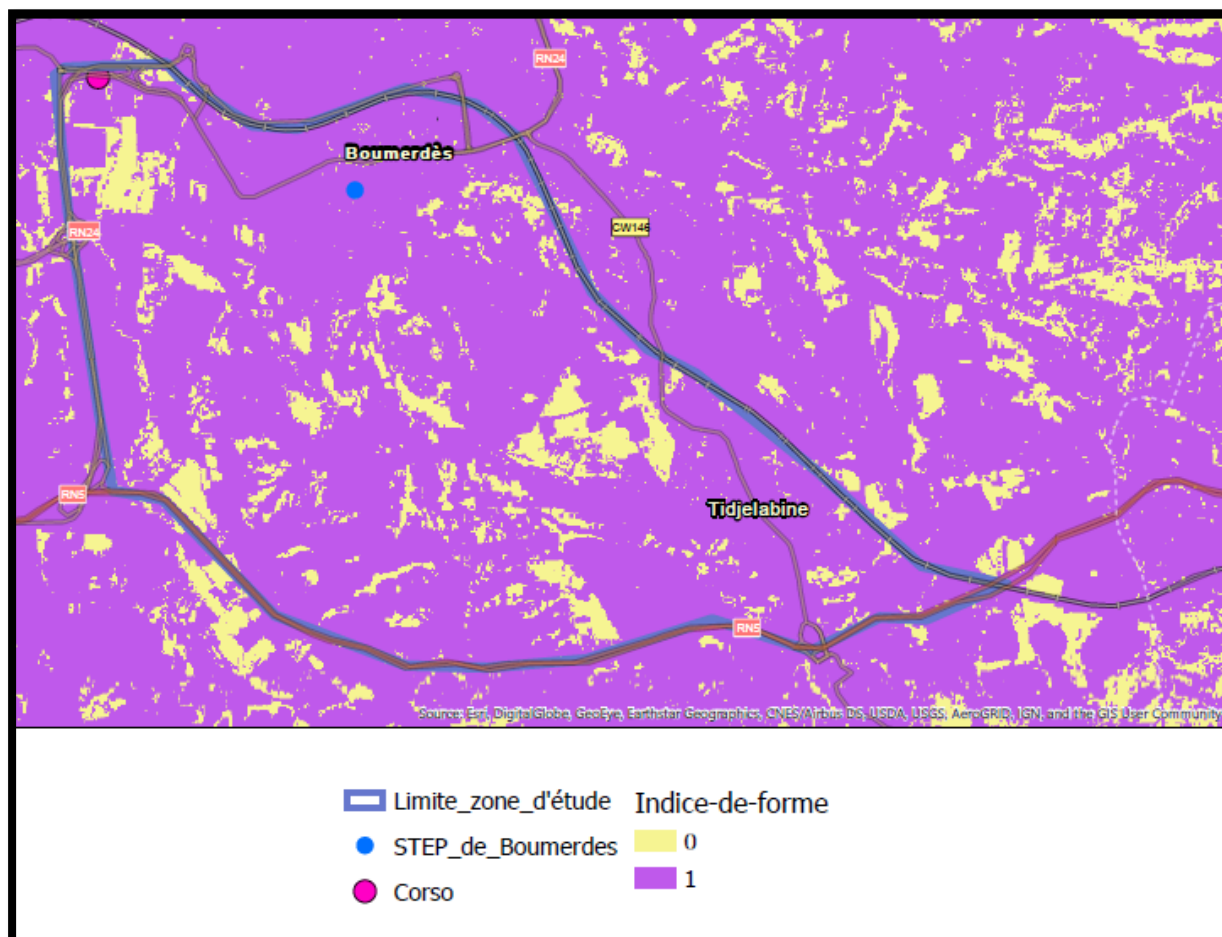
**Figure 34: Calcul de l'indice de forme**

Et on a obtenu la carte suivante :



**Figure 35 : Répartition de l'indice de forme dans la zone d'étude**

Et pour bien distinguer les sols dégradés, on a utilisé « Raster Calculator » avec la formule « Indice-de-forme >= 0 », on a obtenu la carte suivante :



**Figure 36 : Distinction des sols dégradés aux sols développés**

- Les régions qui ont un indice faible « pixels jaunes », ce sont les régions qui ont un sol développé, riche en matière organique.
- Les pixels mauves indiquent un sol dégradé et une teneur en matière organique faible et celle en oxydes de fer.

## 5.6 Conclusion :

La procédure du monitoring utilisée (acquisition d'image satellitaire, prétraitement, calcul des indices de végétation) nous a permis de détecter les divers problèmes rencontrés par la végétation (stress hydrique, manque nutritionnel, chlorose,...etc) sans contact physique avec la végétation pour finalement proposer les solutions adéquates avant qu'il soit trop tard.

**Chapitre 6**  
**Solutions proposées**

## 6 Solutions proposées :

### 6.1 Introduction

Après avoir calculé les indices de végétation, on a pu détecter les zones agricoles qui souffrent de carence, dégradation, stress hydrique ...etc. Donc dans ce chapitre, on va présenter quelques solutions aux problèmes détectés.

### 6.2 Les problèmes et les solutions :

#### 6.2.1 Manque d'azote :

- Faire une mesure in-situ pour déterminer la dose d'azote nécessaire à appliquer.
- Aérer le sol.
- Reformuler la couche d'humus (grande source d'azote) par apport de bois raméal fragmenté.
- Cultiver des engrais verts et effectuez des apports d'engrais organiques ou minéraux :poudre de sang , corne broyée, purin de consoude, purin d'orties....

#### 6.2.2 Manque d'eau :

Faire une mesure in-situ pour savoir si on doit changer la quantité ou la fréquence d'irrigation mais avec respect des réglementations d'utilisation des eaux usées épurées dans l'irrigation

#### 6.2.3 Mauvaise état sanitaire de la végétation et carence en chlorophylle :

Le mauvais état sanitaire de la végétation et la carence en chlorophylle peuvent être dus à un manque de nutriments ou un PH très élevé aux plantes.

Il est donc primordial de faire une analyse du sol afin d'identifier toutes les carences.

- En cas d'insuffisance en fer, qui est un cas courant, il faut appliquer du fer chélaté. Il s'agit d'un fer assimilable au niveau des racines ou par voie foliaire. A ce sujet, il est bon de savoir que les applications foliaires corrigent le problème pendant un moment et ne traitent que les feuilles visibles. Le renouvellement des applications est conseillé afin que les nouvelles feuilles soient prises en compte et que le feuillage reste vert en permanence.
- Si le pH du sol ne correspond pas à la plante, un traitement avec du soufre peut permettre d'y remédier.
- Il y a des cas où la carence du sol est due à un manque de manganèse, déficit engendré par un excès de fer ou de potassium. Les éléments en trop bloquent ainsi l'assimilation du manganèse. Dans un tel contexte, il faut faire usage d'un engrais polyvalent et non ferreux, et faire des changements d'eau afin de réduire les minéraux en excès.
- Parfois la chlorose est due à un manque d'azote donc si c'est le cas on doit faire les consignes citées précédemment.

#### 6.2.4 Prévention de la carence et la toxicité ferreuses :

Pour prévenir efficacement les risques de la carence et la toxicité ferreuse dans les sols il convient de tenir compte aux points suivants :

- La nécessité d'effectuer un suivi de l'évolution de pH et de fer ferreux dans le sol.
- On remédie à la chlorose ferrique par apport au sol ou par pulvérisation sur les feuilles de spécialités à base de fer.
- La biodisponibilité du fer diminue fortement en sols basiques par insolubilisation donc pour augmenter la solubilité on doit diminuer le PH ou faire apport de fer chélaté.
- Faire un apport d'eau aux zones qui souffrent d'un excès de fer pour diminuer leur concentration dans le sol.

#### 6.2.5 Entretien d'un terrain argileux :

- Mélanger des quantités égales de compost végétal, du terreau et de terre d'argile contribue à créer la composition lâche, texture moyenne bien drainée que la plupart des plantes préfèrent.
- Une fois que le sol est travaillé, il faut éviter de marcher ou de rouler dessus. Cela pourrait le tasser et anéantir tous vos efforts !
- Lorsque vous plantez, ajoutez un peu de sable ou de gravillons à la terre. Ces éléments permettront d'assouplir le sol et de le rendre plus facile à travailler.
- Pour accroître la rétention du sol en eau pendant l'été, épandez un paillis entre les plantes : Cette technique, consiste à recouvrir le sol d'une matière organique (carton, végétaux, bouts de bois, etc). En faisant cela, vous limiterez l'évaporation de l'eau.
- Pour contrôler l'érosion éolienne, on recommande notamment les pratiques suivantes : les rotations culturales, le travail du sol de conservation et l'utilisation de brise-vent et de barrières annuelles.



**Figure 1 : Brise-vent**

- Eviter de travailler dans un sol mouillé, faire un drainage de surface, avec des planches en fâte ou arrondies s'égouttant dans des rigoles ou des fossés efficaces.

## 6.2.6 Prévention du risque incendie en milieu agricole :

La prévention du risque incendie est essentielle dans toute exploitation agricole. La chaleur et la fumée dégagées par un incendie, souvent accompagnées de gaz toxiques, peuvent tuer rapidement.

Dans une très grande majorité, les incendies dans les exploitations agricoles et viticoles sont le résultat de négligences et de méconnaissances des règles de sécurité-incendie. Les actions de prévention porteront :

- De vérifier les installations électriques et leur mise en conformité par un professionnel compétent pour assurer leur entretien,
- D'établir des distances de sécurité entre les machines génératrices de chaleur et les matières combustibles.
- Une gestion compartimentée des combustibles inflammables afin d'éviter tous contacts entre matières incompatibles et toute propagation.
- La sensibilisation et la formation des personnes au risque incendie et au bon état opérationnel pour combattre un départ de feu ;
- La mise en place d'un dispositif de détection d'incendie et d'appels de secours permettra un déploiement rapide des équipes d'intervention aussi bien internes qu'externes.
- Des consignes strictes d'interdiction de fumer

## 6.2.7 Dégradation du sol :

### 6.2.7.1 *Qu'est-ce que la dégradation des sols?*

Dans le domaine de la pédologie et de l'écologie, la régression et la dégradation sont des processus d'évolution associés à une perte d'équilibre d'un sol antérieurement stable.

### 6.2.7.2 *Les causes de dégradation des sols :*

- Les pratiques agricoles défectueuses comprennent généralement la mise en culture de sols fragiles, la réduction des jachères sans fertilisation compensatoire, l'irrigation de sols non adéquats et le détournement des cours d'eau pour l'irrigation.

- La perte de matière organique, la déshydratation et le labour, la destruction du couvert forestier protecteur (canopée).



**Figure 2 : Sol dégradé**

### 6.2.7.3 *Mesures de lutte, bonnes pratiques :*

- Appliquer une vraie jachère (celle qui laisse les sols se reposer) après sous-solage ;
  - Des techniques efficaces corrigeant les situations de dégradation ou protégeant les sols de l'impact de la pluie, du vent ou de la circulation de l'eau, non travail du sol, bois raméal fragmenté et surtout couvertures anti érosives en fibres végétales naturelles (paille, coco, jute, foin) ou synthétiques. Ces couvertures, aussi appelées tapis antiérosifs, empêchent la déstructuration de la couche superficielle des sols et leur arrachement. En facilitant l'installation rapide d'un couvert végétal dense, les couvertures antiérosives empêchent la création de ravines et stabilisent les sols.
  - L'apport régulier de matière organique, le non labour et la limitation de l'érosion et du ruissellement (par une couverture végétale permanente et un sol ayant retrouvé une bonne capacité d'infiltration et rétention de l'eau) en sont les principales clés.
  - La prévention peut être menée dans deux directions : il s'agit avant tout de laisser le moins de surface de sol nu le moins longtemps possible d'une part et de ralentir la vitesse des agents érosifs que sont l'eau et le vent d'autre part.
- ✓ **Réduction du temps de dénudation** : Mise en place de semis intermédiaires en période hivernale, ce qui suppose deux fois dans l'année et les cultures intermédiaires de légumineuses présentent l'avantage de fournir de l'engrais vert riche en azote.
  - ✓ **Ralentisseurs d'écoulement** :
    - Tout d'abord, le sens du labour parallèle aux courbes de niveau et un hersage tardif, après la saison hivernale.
    - Le respect de bandes herbeuses le long des ruisseaux, initialement prévues pour lutter contre la pollution des eaux par les produits de traitement, est également un bon ralentisseur d'écoulement.
    - Toujours sur les terrains en pente, la mise en place de fascines dans les rigoles d'écoulement des champs ou de barrages dans les thalwegs.
  - ✓ **Brise-vent** : Conçu à l'origine pour protéger les cultures de l'action néfaste des forts coups de vent, les haies jouent également un rôle fondamental dans la lutte contre l'érosion éolienne. Il s'agit soit de plantations linéaires de végétaux ligneux : chênes, ormes, cyprès et autres soit de plantes herbacées telle la canne de Ravenne.

### 6.2.8 *Manque en matières organiques :*

#### 6.2.8.1 *Les solutions contre la perte en matières organiques des sols :*

##### 6.2.8.1.1 Le maintien d'un taux optimal d'humus :

Il faut maintenir un taux optimal d'humus en apportant de la matière organique, sous formes de fumier, de compost, de Bois Raméal Fragmenté (BRF), de boues ou encore d'engrais verts...

Les boues proviennent, le plus souvent, du traitement des eaux usées par les stations d'épuration. Celles-ci peuvent être valorisées en agriculture si leur teneur en métaux lourds (plomb, zinc, ...) ne dépasse pas les réglementations en vigueur.



#### 6.2.8.1.2 Adapter le mode de travail du sol :

Pour préserver la matière organique, il est donc souvent préférable de travailler moins intensément la terre. On peut remplacer le labour par le décompactage ou, par exemple, travailler le sol uniquement dans la ligne de semis et non pas sur l'ensemble de la parcelle.

#### 6.2.8.1.3 La couverture du sol :

C'est une technique qui consiste à déposer sur le sol des déchets végétaux comme du broyat, par exemple. Cela permettra aussi de protéger le sol de l'érosion.

#### 6.2.8.1.4 Eviter les déboisements et la transformation des prairies en terres de cultures :

Leur conversion en terre de cultures provoque une minéralisation rapide de l'humus et donc une diminution du taux de matière organique dans les sols.

#### 6.2.8.1.5 Favoriser les plantations aux abords des champs :

Les arbres et les haies apportent, grâce à la chute des feuilles, de la matière organique sur les parcelles agricoles.

#### 6.2.8.1.6 Trier ses déchets :

La pratique du compostage est un excellent moyen de valoriser la matière organique issue de notre vie quotidienne.

#### 6.2.8.2 *Les réglementations d'utilisation des boues de STEP de Boumerdès :*

Comme c'est mentionné précédemment, l'épandage des boues présente la meilleure solution pour valoriser les boues issues de la STEP de Boumerdès. Mais, il est nécessaire de procéder à un contrôle analytique constant des boues qui seront issues de l'épuration. Conjointement, il faut prendre des mesures visant à en améliorer la qualité.

**Figure 3 : Stockage des boues de la STEP à la parcelle**



Le contrôle concernera :

- L'analyse des substances nutritives présentes (azote et phosphore) ;
- L'analyse de la teneur en métaux lourds qui s'avère déterminante.

Les valeurs indicatives des teneurs limites en métaux lourds des boues qui ne permettent pas un épandage dans l'agriculture, sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 1 : Les teneurs de référence limites en métaux lourds des boues**

<b>Elément ou composé</b>	<b>Valeur de référence dans les boues de matière sèche (mg/Kg)</b>	<b>Valeur limite dans les boues de matière sèche (mg/Kg)</b>
Cuivre (Cu)	1000	2000
Zinc (Zn)	3000	6000
Chrome (Cr)	1000	2000
Nickel (Ni)	200	400
Cadmium (Cd)	20	40
Plomb (Pb)	800	1600
Mercure (Hg)	10	20
Cr + Cu + Ni + Zn	4000	8000

**Norme NFU 44.041**

De plus, afin d'assurer la protection des nappes phréatiques, les boues ne peuvent être épandues que sur des terrains agricoles favorables qui ont été déterminés par une étude globale des potentialités de valorisation.

Un suivi agronomique des quantités de boues épandues et de la qualité des sols récepteurs est nécessaire.

**Tableau 2 : Valeurs limites en agents pathogènes**

	<b>Teneur limite à respecter</b>	<b>Norme AFNOR</b>
Listeria monocytogènes	Absence dans 1 mg MB*	NF V 08-055
Salmonella	Absence dans 1 mg MB	NF EN 12824 NF V 08-052

MB : Matière brute (boue pâteuse) '\*' Uniquement pour les cultures à consommer crues

**Tableau 3 : Valeurs limites en micro-organismes**

	<b>Teneur limite à respecter</b>	<b>Norme AFNOR</b>
Escherichiacoli	$10^3$ à $10^4$ / g MB	NF V 08-053
Entérocoques	$10^4$ à $10^5$ /g MB	NF T 90-432
Clostridium perfringens	$10^2$ à $10^3$ /g MB	NF V 08-056
Œufs d'helminthes viables	Absence dans 1 g MB	

Les critères d'innocuité doivent être vérifiés au minimum tous les 6 mois et au moins lors de tout changement de nature ou d'origine des matières premières utilisées.

Pour empêcher le risque de transmission de maladies infectieuses à cause de l'usage des boues de la STEP en agriculture, on dispose donc de deux moyens

1) L'intervention sur les pratiques et les conditions d'épandage, telle que :

- Ne pas épandre des boues non désinfectées sur des végétaux destinées à être consommées crus ;
- Le lieu d'épandage doit être à 100 m des zones habitées ou fréquentées par le public ;
- Respecter un temps minimum (06 semaines) entre l'épandage et la mise en pâturage ;
- Eviter des apports au voisinage immédiat des points d'eau pour éviter toute infiltration ;
- Enfouissement pour prévenir les risques liés au ruissellement ;
- Protection adéquate du personnel de la station d'épuration par des mesures hygiéniques élémentaires (vêtements adaptés au type de travail, port de gants, port de masque anti poussières, lavage des mains, etc...).

2) L'hygiénisation des boues, c'est à dire le traitement permettant de "réduire à un niveau non détectable les agents pathogènes présents". Cette hygiénisation peut se faire par action de la chaux (chaulage), par séchage ou compostage thermique.

### **6.3 Conclusion :**

L'analyse des résultats obtenus par le calcul des indices de végétation nous a permis de déterminer les problèmes rencontrés par la végétation et donc proposer les solutions adéquates à chaque problème pour éviter les pertes et maximiser le rendement.

**Chapitre 7**  
**Modulation des intrants**

## 7 Modulation des intrants :

### 7.1 Introduction :

Après avoir construit les cartes des indices de végétation, on doit construire la carte de préconisation et ça peut être fait par 2 façons :

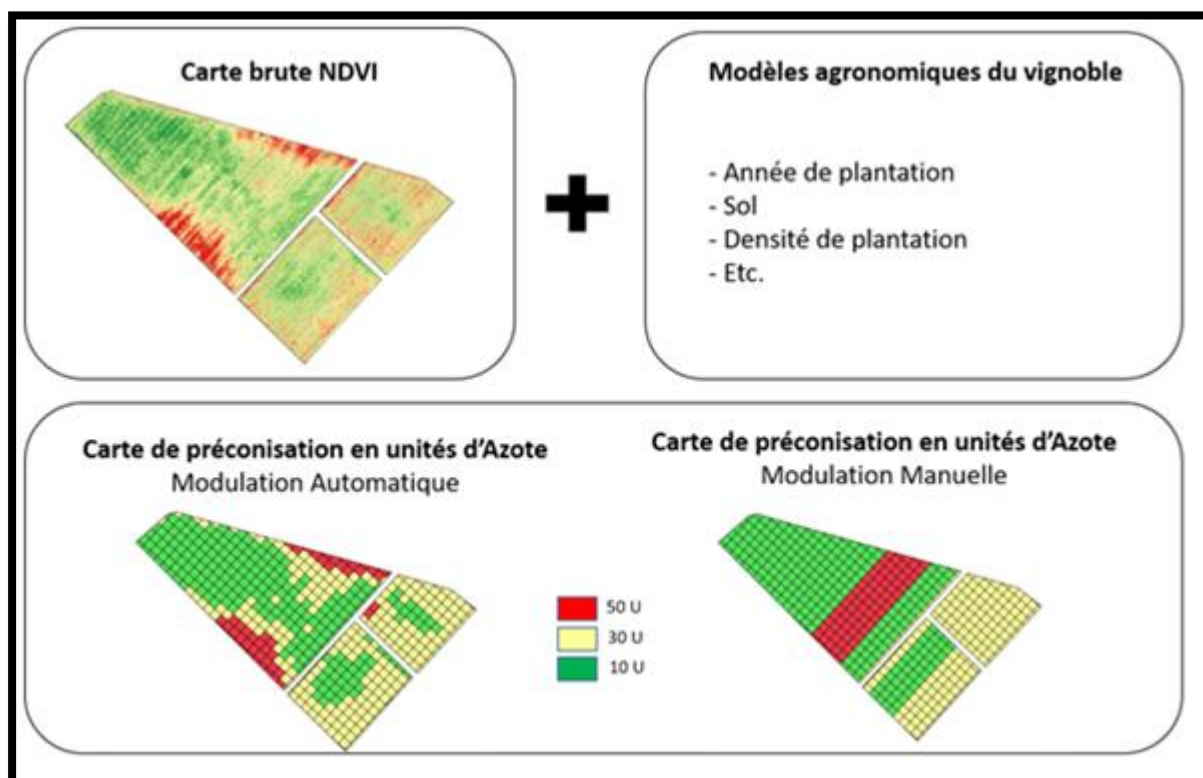
- Soit en analysant les cartes des indices en fonction des caractéristiques de la zone d'étude tels que le type de végétation, l'année de plantation, le type du sol,... etc et de les relier au but de production afin de les transformer en carte de préconisation
- Soit on fait un déplacement sur terrain pour prendre des mesures de chaque zone et après déterminer la dose à appliquer dans chaque zone et construire la carte de préconisation.

#### Remarque :

La non disponibilité des données spatiales de type de végétation, type de sol, mesures par capteur,... etc m'a empêché de construire la carte de préconisation de la zone d'étude.

### 7.2 La carte de préconisation :

La carte de préconisation contient les informations permettant d'agir concrètement sur le terrain. A titre d'exemple, il s'agit d'une carte de préconisation de fertilisation azotée. Chaque zone de la carte contient la dose d'azote à appliquer comme le montre la carte ci-dessous.



**Figure 1 : Carte de préconisation**

Prenons l'exemple d'une carte NDVI. L'objectif du propriétaire est de segmenter ses parcelles en fonction de ses objectifs de production et le type de végétation car chaque type de végétation aura donc des rendements à atteindre différents. Grâce à des modèles

agronomiques prenant en compte les paramètres fixes de la zone d'étude, la carte brute NDVI pourra être exprimée en fonction des rendements et des objectifs à atteindre pour chaque type de végétation !

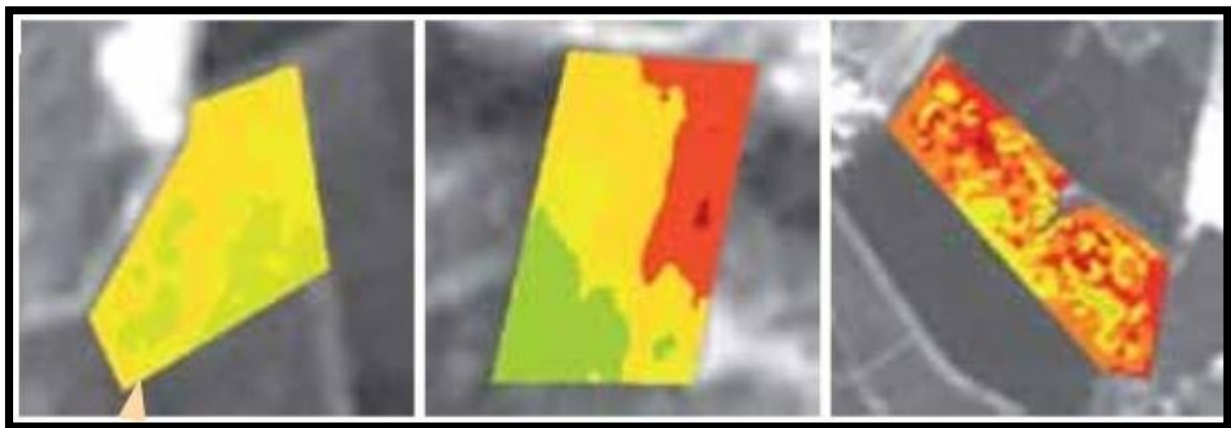
### 7.3 Modulation des intrants :

En premier lieu, il faut savoir que toutes les parcelles ne présentent pas forcément l'intérêt d'être modulées. En effet, selon une étude de l'entreprise Farmstar, il y a environ 48 % des parcelles de blé et 15 % des parcelles de colza dont la modulation n'est pas nécessaire. Pour valoriser cette technique, plusieurs conditions doivent être réunies :

- Il faut qu'il y ait une forte hétérogénéité intra-parcellaire pour les apports.
- Il faut une bonne structuration de la variabilité, c'est-à-dire la possibilité de distinguer des zones homogènes.
- Il faut enfin une taille de zones homogènes assez grande pour être compatible avec une gestion modulée des apports.

Si une parcelle présente un intérêt pour la modulation, il y a encore 2 types de cas à prendre en compte.

Le premier concerne les parcelles qui ont des zones d'hétérogénéité bien distinctes et peu nombreuses, ce qui n'impose pas de changement fréquent des doses. Dans ces cas là, la modulation peut être faite manuellement par l'agriculteur. Dans les autres cas où la variabilité est moins bien organisée et où les changements de doses sont trop fréquents, la modulation doit être automatisée.



**Figure 2 : Zones agricoles avec différents degrés d'hétérogénéité**

La carte de la parcelle de gauche est considérée comme homogène, celle du milieu comme modulable manuellement et celle de droite comme modulable automatiquement

- Pour le cas de la modulation manuelle, l'agriculteur parcourt sa parcelle en changeant les doses en fonction de la carte de préconisation obtenue via les observations des drones/satellites. Il la visualise sur un écran lié à un GPS, ce qui lui permet de voir son tracteur se déplacer dans la parcelle. Il pourra ensuite lui-même modifier la dose sur le boîtier de l'épandeur. Cependant, c'est seulement une dose approchant les besoins de la plante qui est épandue. Il y a également un grand risque d'erreur humaine dans le cas d'un oubli de changement de dosage par exemple.

- Pour le cas de la modulation automatique, le GPS a la même fonction que pour la modulation manuelle : localiser le tracteur sur la carte de préconisation (visible par l'agriculteur via un écran). Le boîtier gérant la carte de préconisation envoie au boîtier de l'épandeur le dosage à appliquer. Celui-ci va ouvrir ou fermer les trappes en fonction de la dose à appliquer. Compte tenu de la lecture automatique de la carte de préconisation, les erreurs sont limitées, sauf en cas de problème sur la carte de préconisation elle-même. Cette solution a également l'intérêt de permettre de vérifier les doses réellement épandues sur la parcelle grâce à la carte de retour fabriquée par le boîtier d'épandage.

Le deuxième c'est l'utilisation des capteurs.

## 7.4 Le monitoring en temps réel :

### 7.4.1 Introduction :

Après avoir déterminé les zones qui souffrent de la carence en azote, en eau, en chlorophylle, ... etc, il est temps d'aller aux champs pour résoudre ces problèmes et puisque l'eau utilisée dans l'irrigation est une eau usée épurée, cela nécessite un suivi de la qualité de ces eaux.

La dose exacte nécessaire qui doit être apportée au sol et le suivi de la qualité des eaux utilisées peuvent être déterminés soit via le test traditionnel en laboratoire soit en utilisant des capteurs. Le test est cependant laborieux, et nécessite jusqu'à trois semaines avant d'être complété donc la meilleure solution est l'utilisation des capteurs.

### 7.4.2 Qu'est-ce qu'un capteur ?

Un capteur transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif de contrôle commande.

La fonction principale du capteur est d'analyser le signal émis par une surface sur différentes longueurs d'onde. Il va alors mesurer le flux de photons réfléchis. Ensuite, un système optique collecte le rayonnement réfléchi par la surface et l'envoie sur un dispositif de sélection de longueur d'onde (comme un prisme par exemple). Le détecteur enregistre ensuite, pour chaque longueur d'onde, le nombre de photons ayant frappé sa surface. On peut ainsi obtenir le pourcentage de réflectance des végétaux aux longueurs d'ondes choisies.

### 7.4.3 Capteurs proposés :

Dans ce présent projet, on propose quelques capteurs qui doivent être utilisés pour mieux monitorer notre exploitation agricole.

#### 7.4.3.1 *Système de contrôle d'application de l'azote GreenSeeker RT200 :*

Le GreenSeeker est un capteur actif, il émet ses propres sources de lumière, lui permettant de s'affranchir des conditions climatiques. Plusieurs capteurs optiques sont installés sur l'outil afin d'analyser les besoins de la plante avec la mesure du NDVI.

Les capteurs donnent l'information en temps réel au boîtier de régulation de l'épandeur ou du pulvérisateur pour apporter la dose optimale. L'écran permet de visualiser l'analyse des capteurs optiques en temps réel.

Le système GreenSeeker peut également être utilisé avant la fertilisation ou pulvérisation afin d'établir une carte de préconisation d'apport azoté pour la parcelle.

L'utilisation de ce type de capteur cause une augmentation de rendement pour une exploitation de 250 ha et un retour d'investissement au bout de 4 à 5 ans.



**Figure 3 : Capteur GreenSeeker**

#### 7.4.3.2 *Monitor Watermark* :

Monitor Watermark indique quand et combien irriguer en temps réel en toute circonstance sur l'exploitation pour former et maintenir le bulbe sans excès ni manque. Monitor enregistre 6 sondes automatiquement, on prend 20 décisions par saison (1 par semaine). La dose unitaire égale à 1 L par goutteur maximum. Chaque semaine, on adapte la fréquence. Monitor surveille le bulbe goutte-à-goutte en permanence.

Le transfert sur ordinateur s'effectue 1 fois par semaine en sorti d'hiver. A tout moment, possibilité de lecture instantanée du Monitor (en hiver).



**Figure 4 : Monitor Watermark**



## Transmission GPRS par module additionnel :

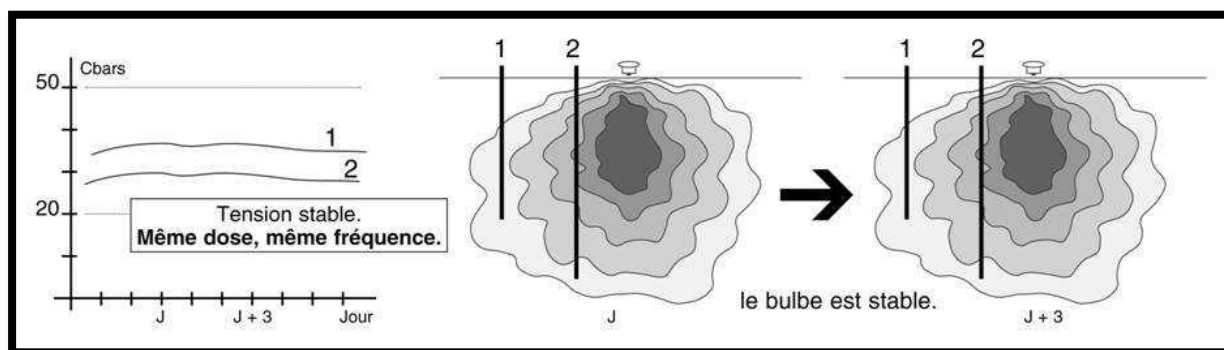
Le fichier de relevé arrive dans la boîte e-mail ou message d'alerte arrive sur téléphone mobile du propriétaire sans intervention

Pour préserver le sol, une application Excel calcule la tension ou dépression de l'eau du sol minimale correspondant à la pression exercée par les chenilles.

Monitor Watermark® peut permettre un gain de rendement jusqu'à + 50 % et réduit le temps passé à l'irrigation.

Les cas qui peuvent se présenter :

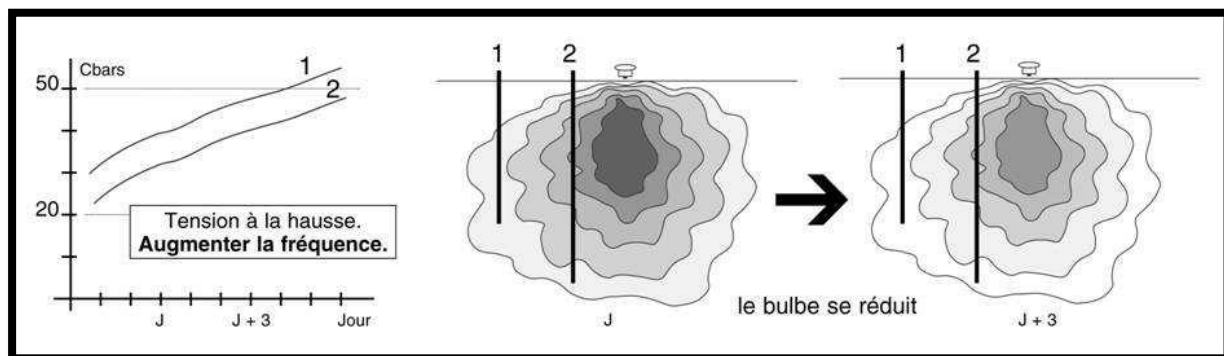
- Stabilité des tensions = maintien du bulbe



**Figure 5 : Graphique Monitor cas : stabilité des tensions**

Si le graphique Monitor de la semaine montre une stabilité des tensions, sans dépasser le seuil, on garde la même fréquence d'irrigation pour la semaine suivante.

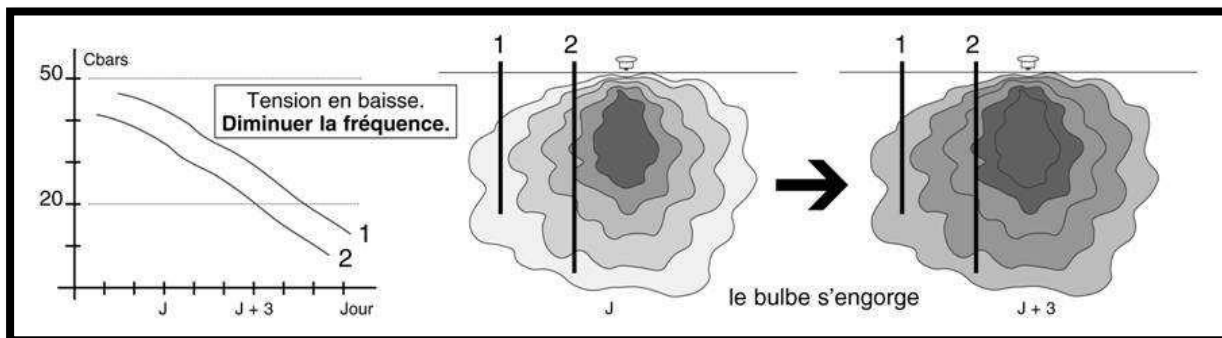
- Si les tensions augmentent en surface(1) et en profondeur(2) :



**Figure 6 : Graphique Monitor cas : augmentation des tensions**

Si le graphique Monitor de la semaine montre une hausse des tensions au-dessus du seuil, on augmente la fréquence d'irrigation pour la semaine suivante.

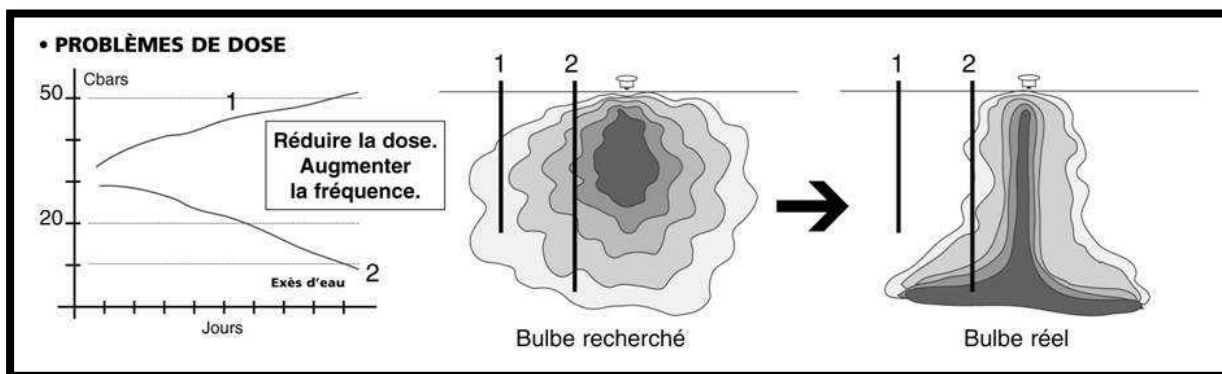
- Si les tensions baissent en surface(1) et en profondeur(2) :



**Figure 7 : Graphique Monitor cas : diminution des tensions**

Si le graphique Monitor de la semaine montre une baisse des tensions en-dessous du seuil, on baisse la fréquence d'irrigation pour la semaine suivante.

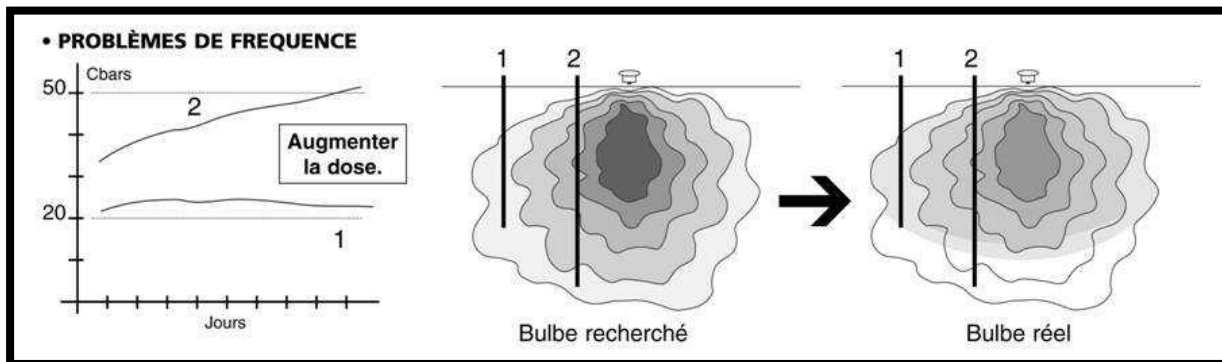
- Si la tension augmente en surface et baisse en profonde :



**Figure 8: Graphique Monitor cas : augmentation et diminution des tensions**

Dans ce cas, vérifier et réduire la dose autour de 1L et augmenter la fréquence

- Si la tension reste stable en surface(1) mais augmente en profondeur(2) :



**Figure 9 : Graphique Monitor cas : stabilisation et augmentation des tensions**

Dans ce cas, vérifier dose = 1L (+/- 15%) si la dose est correcte, augmenter la fréquence.

#### 7.4.3.3 *Capteurs de LAI :*

Afin d'éviter les évapotranspirations trop faibles ou trop fortes et s'assurer d'obtenir un rendement maximal, il est conseillé de suivre l'indice de surface foliaire.

La technique utilisée par ce capteur est basée sur la prise d'une image photo hémisphérique via une lentille « fisheye » 180° et le calcul de LAI avec une résolution d'écran de 512×512 pixels au minimum et les données sont sous format d'excel.



**Figure 10 : Capteur de LAI**

#### 7.5 Conclusion :

La dernière étape du monitoring en agriculture c'est la modulation des intrants. Cet étape se fait soit manuellement ou automatiquement tout dépend du degré d'hétérogénéité de la carte de préconisation de la zone d'étude. La modulation des intrants permet d'avoir une végétation saine et satisfaite.

## **Conclusion et perspectives :**

L'Algérie est parmi les pays déficitaires en eau et aussi affectée par le changement climatique. Une des options est la réutilisation des eaux rejetées à partir des stations d'épuration urbaines et/ou industrielles en fin d'irrigation.

Néanmoins, l'impact d'une irrigation à partir d'une ressource non conventionnelle sur les cultures irriguées mais aussi sur les sols doit être étudié et suivi finement pour éviter les impacts négatifs de cette technique.

Le suivi en temps réel et/ou monitoring d'une zone agricole irriguée en vue d'un pilotage à partir d'une ressource en eau non conventionnelle est devenue actuellement une nécessité incontournable. Au vue des défis environnementaux régionaux mais aussi mondiaux.

C'est dans ce contexte que cet essai méthodologique de monitoring de zones agricoles irriguées par la station d'épuration de Boumerdès a été tenté. Et cela en prenant appui sur l'usage de moyens innovants mais aussi d'outils fédérateurs dans le temps et dans l'espace, mais aussi le développement de portabilité de solutions alliant le traitement de photos satellitaires. Et dont le traitement a été effectué moyennant un interfaçage à des outils de cartographie numérique ainsi que de la technologie des capteurs connecté dont l'usage se démocratise et devient un moyen de mesure en temps réel de paramètres in situ.

Il a fallu dans un premier temps définir puis déterminer les paramètres que l'on doit contrôler et cela par le téléchargement et la correction d'une image satellitaire via QGIS puis le calcul des indices de végétation par le biais du logiciel ArcGis Pro et interpréter les résultats obtenus et proposer des solutions aux problèmes détectés.

L'analyse des cartes des indices de végétation ainsi construites, a permis de détecter des zones où des carences en azote existent ainsi qu'en humidité mais aussi celles qui souffrent d'une toxicité ferreuse. Ce qui a provoqué un mauvais état sanitaire et nutritionnel de la végétation. Un manque de matières organiques a été identifié ainsi que des zones dégradées. Des sols argileux ont pu être trouvés et nécessitent une méthode de travail spécifique, afin de tirer parti de leurs richesses en matières fertilisantes et leurs grande capacité de rétention en eau.

Néanmoins, la carte de préconisation n'a pas été établie pour notre cas d'étude, car les mesures sur terrain sont manquantes et dépassent de loin les objectifs méthodologiques de ce présent travail. Toutefois, la démarche et moyens à mettre en œuvre ont été traités et définis.

Ce travail représente les premières étapes à suivre pour détecter sans aucun contact physique les problèmes en agriculture et éviter toute perte de rendement agricole et donc maximiser les rendements, mais il serait intéressant de procéder à une étude qui utilise des données sur le type de végétation et du sol .....etc et des mesures in-situ pour restituer la carte de préconisation et déterminer les paramètres biophysiques de toute la région en se basant sur la corrélation entre les indices de végétation et les mesures in-situ et également la possibilité d'utiliser des modèles agronomiques (QualiTree, Maelia,...etc).

Les modèles agronomiques permettent de prévoir les conséquences des changements globaux et de pratiques en fonction des conditions locales (contextes socio-économiques, conditions pédoclimatiques) et concevoir des systèmes de culture adaptés.

## **Références bibliographiques :**

- [1] D. G. Hadjimitsis, G. Papadavid, A. Agapiou, K. Themistocleous, M. G. Hadjimitsis, A. Retalis, S. Michaelides, N. Chrysoulakis, L. Toullos, et C. R. I. Clayton. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences* [en ligne], 2010, vol .,10, n° 89,[ consulté le 14 Février 2019] . p.89-95.Disponible sur Researchgate.net
- [2] Goutiers, V., Laurent, P. (2014). Quelle plus-value pour le suivi des essais au champ, de l'exploitation des informations géo-localisées des capteurs de proxi et télédétection avec des méthodes géomatiques? *Cahier des Techniques de l'INRA* (2014), 132-140.  
Disponible sur : < <https://prodinra.inra.fr/record/322110> >
- [3] Vizier, Jean-François. La toxicité ferreuse dans les sols de rizières Importance du problème causes et mécanismes mis en jeu conséquences pour l'utilisation des sols. Antenne ORSTOM auprès du CEA DB-SRA [en ligne] , 1990, n°30,[consulté le 09 Mai 1990].p.1- 13.  
Disponible sur :  
< <https://docplayer.fr/62762988-La-toxicite-ferreuse-dans-les-sols-de-rizieres.html> >
- [4] Challenge Agriculture, WATERMARK ® L'eau du sol maîtrisée. [ consulté le 15 mars 2019].Disponible sur : <http://www.challenge-agriculture.fr/fr/materiel/pilotage-des-cultures>.
- [5] Bergeron, Marc. Caractérisation du recouvrement végétal et des pratiques agricoles à l'aide d'une image TM de Landsat au nord du Viêt Nam. 60 pages. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement Télédétection : Canada, Département de géographie et télédétection Faculté des lettres et sciences humaines Université de Sherbrooke : 2000.
- [6] Congedo, Luca. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation : Release 5.3.6.1[en ligne].13 Avril 2018. [Consulté le 20 Avril 2019]. Disponible sur :  
[https://www.researchgate.net/.../307593091\\_SemiAutomatic\\_Classification\\_Plugin\\_Documentation](https://www.researchgate.net/.../307593091_SemiAutomatic_Classification_Plugin_Documentation)
- [7] Hodgert Jason, Jones Kevin, Graumann Clint. Deriving information from geospatial imagery for agriculture with Geomatica and ArcGis webinar, 17 Septembre 2014, Canada. Publié le 7 Juin 2018.
- [8] Nationale Eau et Environnement. Etude Préliminaire et collecte des données de base de la réutilisation des eaux usées épurées de la STEP de Boumerdès.
- [9] Melamed Shawn. Agricultural monitoring workflow using Geomatica and free Landsat 8 Imagery, 7 Novembre 2013, Toronto, Canada. Publié le 7 Juin 2018.
- [10] Magruder Charlie, Takow Elvis,Slone Brent, Berker Peter,Benkelman Cody. Imagery in ArcGis for Agriculture. Publié le 11 Avril 2018.
- [11] LG. Comment choisir son indice foliaire pour un rendement maximum ? [en ligne]. [consulté le 10 mai 2019]. Disponible sur :  
<https://www.lgseeds.fr/fr/comment-choisir-son-indice-foliaire-pour-un-rendement-maximum>

[12] Kazemipour Farzaneh. Utilisation d'une série d'images temporelles FORMOSAT acquises sur la région Crau Camargue pour le suivi de la dynamique des couverts végétaux.50 pages. Mémoire de MASTER 2<sup>ième</sup> année Spécialité : Méthodes physiques en télédétection, *UNIVERSITE Pierre et Marie CURIE* : 2007.

[13] Mokarram Marzieh, Bolorani Ali Darvishi, Hojati Majid. Relationship between land cover and vegetation indices. Case study: Eghlid plain, Fars province, Iran. *European Journal of Geography June 2016, Volume 7, Number 2, p. 48 – 60.*

[14] Ledant Martin. Les indices de végétation. 23 pages. Travail de fin d'études de Bachelier : Faculté des sciences de géographie : Université de Liège : 2007.

[15] ArcGis Pro. Galerie d'indices [en ligne]. [consulté le 18 Mars 2019]. Disponible sur : <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm>.

[16] TractorPoxer. Nutri-Stat 'Lab on Chip' de MMM [en ligne]. [Consulté le 1 Mai 2019]. Disponible sur : <http://www.tractorpower.eu/FR/nieuws/?n=29>

[17] ADASA. DBO Appareil automatique de mesure de la DBO5 (Mod. B306) [en ligne]. [consulté le 2 Mai 2019]. Disponible sur : <http://adasaproducts.com/fr/portfolio/dbo/>

[18] Wordpress. L'agriculture de précision. Drones, satellites... Les technologies peuvent-elles réellement révolutionner l'agriculture ? [en ligne]. [Consulté le 15 Avril 2019]. Disponible sur : <https://agriculturedeprecision.wordpress.com/>

[19] Wikipedia. Sentinel-2 [en ligne]. [consulté le 3 Mars 2019]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2>

[20] UVED. EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection [en ligne]. [Consulté le 3 Mars 2019]. Disponible sur : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvéd/envcal/html/vegetation/indices/principe.html>

[21] EU Science Hub The European Commission's science and knowledge service. Agricultural monitoring [en ligne]. [consulté le 10 Mars 2019]. Disponible sur :

<https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/agricultural-monitoring>

[22] Gerbeaud. Identifier et corriger les carences en azote, phosphore, potassium. [en ligne]. [consulté le 3 Mai 2019]. Disponible sur : <https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/carences-plantes-azote-phosphorepotassium,1543.html>

[23] USGS. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product [en ligne]. [Consulté le 3 Avril 2019]. Disponible sur : <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>

[24] Hanqiu Xu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* [en ligne], 2006, Vol. 27, No. 14. [consulté le 15 Mai 2019]. p. 3025–3033. Disponible sur Researchgate.net

**Annexes :**



**Bassin d'aération**



**Bassin de clarification**



**Local de chloration**