

---

**Mémoire de stage**

---

**Master 2 de Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement (TGAE)**

**Sujet : établir et automatiser une méthode de conseil en fertilisation azotée sur le blé en consolidant les données satellites d'état végétatif et les données de potentiel de sol.**



Réalisé par :

**Mamadou BA**

Master 2 TGAE

Sous la direction de :

**Mr Clément AOUIZERATE**

Responsable de stage

Et de **Mr Brice ANSELME**

Responsable pédagogique

Lieu : WANAKA, Tour de Montparnasse, 33 Avenue du Maine 75015, Paris France

Période du 01/02/2023 au 31/07/2023

**Mémoire confidentiel**

Année universitaire 2022/2023



## Sommaire

Sommaire .....	3
Remerciements .....	4
Sigles et abréviation .....	5
Résumé .....	6
Abstract .....	6
Introduction .....	7
I) Présentation de l'entreprise .....	9
II) État de l'art des méthodes de conseils en fertilisation azotée du blé .....	17
III) Réalisations techniques : conception et automatisation d'une nouvelle méthode de conseil en fertilisation azotée .....	32
IV) Résultats et discussions .....	41
Conclusion .....	57
Références bibliographiques .....	58
Table des matières .....	61
Tables des figures .....	62
Annexes .....	63



## Remerciements

Il me paraît indispensable avant de commencer ce rapport de remercier Mme Agathe HAMON et Mr Clément AOUIZERATE qui m'ont permis de réaliser ce stage au sein de Wanaka.

Je tiens à formuler mes remerciements à mon responsable de stage Clément AOUIZERATE, qui a eu la patience, la disponibilité, l'écoute, et la pédagogie pour m'accompagner durant toute la période de mon stage. Sa rigueur et sa disponibilité ont fait de ce stage une expérience forte et enrichissante.

Je voudrais également adresser mes remerciements à mon responsable pédagogique, Mr Brice ANSELME, pour son soutien constant et ses conseils avisés tout au long de mon travail de recherche. Votre présence encourageante m'a donné l'assurance nécessaire pour mener à bien ce projet ambitieux. Mes sincères remerciements au corps professoral du Master TGAE.

J'adresse enfin mes remerciements aussi à toute l'équipe de Wanaka avec qui j'ai travaillé au quotidien durant tout au long de mon stage.

## Sigles et Abréviations

**AP** : Agriculture de Précision

**COMIFER** : Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

**DFE** : Dernière Feuille Étalée

**GREN**: Groupes Régionaux d'Experts Nitrates

**LAI**: Leaf Area Index

**LIST**: Luxembourg Institute of Science and Technology

**NDVI** : Indice de Végétation par Différence Normalisé

**OAD** : Outil d'Aide à la Décision

**PIR** : Proche Infrarouge

**S2REP**: Sentinel-2 Red-Edge Position

## Résumé

Dans un monde en pleine mutations technologiques, l'agriculture de précision émerge pour répondre aux défis qu'affronte l'agriculture moderne tels que l'augmentation de la demande alimentaire mondiale, la préservation des ressources et l'amélioration de l'efficacité économique pour les agriculteurs. Cette agriculture de précision vise l'optimisation des rendements des cultures notamment les grandes cultures et la minimisation de l'impact environnemental. Ce processus nécessite le suivi des cultures sur tous leurs stades tout en préconisant des outils et méthodes combinant la technologie, l'informatique et l'agronomie. C'est dans ce contexte que la structure Wanaka spécialisée dans les outils d'aide à la décision (OAD) pour l'agriculture de précision (AP) s'efforce à mettre en place des méthodes et modèles de conseil pour répondre aux besoins des agriculteurs pour les grandes cultures notamment en fertilisation azotée du blé. L'objectif est de développer une méthode de conseil en fertilisation azotée en alliant des informations fournies par les satellites sur l'état végétatif de la culture et des données sur le potentiel de sol. Cela permettra aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées sur la quantité optimale d'azote à appliquer, en fonction des besoins spécifiques de leurs cultures de blé. En alliant innovation technologique et approche écologique, nous favorisons une agriculture durable pour l'avenir..

## Abstract

In a world in the throes of technological change, precision farming is appearing to meet the challenges facing modern agriculture, such as increasing global food demand, preserving resources, and improving economic efficiency for farmers. Precision farming aims to optimize crop yields, particularly for field crops, and minimize environmental impact. This process involves monitoring crops at every stage, using tools and methods that combine technology, information technology and agronomy. It is against this backdrop that Wanaka, which specializes in OAD for AP, is striving to develop advisory methods and models to meet farmers' needs for field crops, particularly in terms of nitrogen fertilization for wheat. The aim is to develop a method for advising on nitrogen fertilization by combining information provided by satellites on the vegetative state of the crop and data on soil potential. This will enable farmers to make informed decisions on the optimum amount of nitrogen to apply, according to the



specific needs of their wheat crops. By combining technological innovation with an ecological approach, we are promoting sustainable agriculture for the future.

## Introduction

L'agriculture de précision est devenue une approche importante pour l'optimisation des rendements agricoles, la réduction de l'utilisation d'intrants de production et l'incitation à la durabilité environnementale. Dans ce sillage, elle nécessite une évaluation précise de la biomasse des cultures et des conseils sur la fertilisation azotée pour une gestion efficace des cultures et une utilisation rationnelle des ressources. En France, où l'agriculture domine, ces enjeux sont particulièrement importants, tant sur le plan économique qu'écologique.

L'importance de l'estimation de la biomasse permet de connaître la quantité de matière organique produite par les plantes, elle nous fournit des informations précieuses sur leur croissance, leur productivité et leur santé. L'estimation précise permet aux agriculteurs un ajustement de leurs pratiques agricoles mais aussi de leurs décisions sur les mesures de protection et de gestion pour l'optimisation de leurs rendements. Avec le contexte climatique qui est variable d'année en année, il en résulte nécessairement un raisonnement qui s'appuie sur l'évaluation de manière continue du besoin en azote pendant le cycle de la culture. L'azote contenu dans les grains reste proportionnel à celui absorbé pendant tout son cycle végétatif.

En France, la fertilisation azotée est indispensable à la croissance et au développement des cultures, notamment le blé qui est la céréale de base. Néanmoins, une mauvaise utilisation de l'azote peut entraîner une perte des ressources, une pollution de l'environnement et une baisse de la qualité des cultures. Des directives précises de fertilisation azotée adaptées aux cultures optimisent l'utilisation de l'azote et les rendements, réduisent les coûts de production et minimisent l'impact environnemental.

Dans le contexte actuel d'agriculture de précision, l'utilisation des nouvelles technologies et de l'informatique offre des opportunités en termes de précision et de gestion de temps pour atteindre le maximum de rendement tout en respectant l'environnement.

La structure Wanaka est dans une démarche de recherche des meilleures solutions à travers les OAD, en prenant en compte l'unicité du contexte de chaque année, face à une concurrence affluente du milieu des OAD pour l'AP. Elle s'inscrit dans une dynamique de suivre le plus près possible les besoins en azote du blé, en respectant l'environnement tout en assurant un rendement de qualité. Toujours dans cette démarche d'amélioration des OAD, de nouveaux partenariats sont développés afin d'améliorer ses offres en fertilisation azotée, consistant à équilibrer les besoins en azote selon l'objectif du rendement et du potentiel de sol. L'idée est d'adapter la dose à apporter en fonction de ce que le sol est capable de fournir en rendement tout en respectant l'environnement.

Face à ces défis, la problématique suivante se pose :

Comment créer une méthode de conseil en fertilisation azotée du blé en combinant des données satellitaires sur l'état végétatif et le potentiel du sol pour fournir une recommandation précise et adaptée aux besoins des cultures de blé en France ? Comment automatiser cette méthode ?

Cette problématique soulève des questions essentielles sur l'intégration des données satellitaires et des données agronomiques et le développement de modèles et d'outils d'automatisation pour améliorer la gestion de la culture de blé en France. Résoudre ces problèmes permettrait d'optimiser les rendements, de réduire l'utilisation des intrants de production, de minimiser l'impact environnemental et de favoriser une agriculture plus durable et plus rentable en France. Nous allons dans un premier temps présenter l'entreprise et son domaine d'intervention, dans un, second temps explorer les modèles existants pour la fertilisation azotée et celui qu'utilise Wanaka à travers un état de l'art, ensuite faire la conception et la réalisation du modèle de conseil en fertilisation azotée, et enfin présenter et discuter les résultats.



## I-) Présentation de la structure Wanaka

### I-1) Wanaka, une structure qui a su développer des compétences unissant télédétection et agronomie.

Wanaka est une structure spécialisée dans la commercialisation d'Outils d'Aide à la Décision (OAD) et d'Outils d'Agriculture de Précision en France et à l'international depuis 2014 (Wanaka,2023). Associée en 2016 avec le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) et avec l'Université de Liège, ils ont créé AGROPTIMIZE une filiale de recherche et de développement. Un travail collaboratif permet d'apporter des solutions innovantes de nouveaux OAD destinés à la filiale agro-industrielle. L'entreprise se distingue par sa vision novatrice et son engagement à fournir des solutions avancées pour optimiser les pratiques agricoles.

Wanaka intervient dans différents domaines d'expertise (figure 1) notamment les plus connus sont le zonage de sol et la modulation de densité de semis, dans la gestion de fumure azoté (blé, colza et orge), dans la gestion des risques phytosanitaires et dans le diagnostic des dégâts. Le schéma ci-dessous représente les différents domaines d'expertises de Wanaka.

ci-dessous



Figure 1 : Domaine d'expertise de Wanaka

La structure propose deux outils d'aide à la décision : Agrorendement et Phytotech

Agrorendement (annexe 1) est spécifiquement conçu pour la gestion de la fertilisation azotée en utilisant des images de télédétection conjointement avec les modèles agronomiques. Son objectif est de fournir des conseils précis en matière de fertilisation en positionnant la quantité optimale d'engrais au bon endroit (la bonne dose, au bon moment au bon endroit).

Les doses moyennes réglementaires sont recalculées en fonction des besoins réels de chaque parcelle. Ensuite, ces doses sont ajustées en fonction de l'hétérogénéité de la parcelle, de la biomasse et de l'azote absorbé calculé et observé. En début de cycle, une stratégie de compensation est utilisée. Cela signifie que davantage d'engrais est apporté aux zones présentant un développement moins avancé, et vice versa. L'objectif est d'homogénéiser la parcelle en termes de biomasse. En fin de cycle de croissance, une stratégie de renforcement (principe inverse) est adoptée. Cela signifie que les apports d'engrais sont plus élevés dans les zones présentant le meilleur développement. L'objectif est d'assurer un rendement optimal en préconisant une dose d'azote proportionnel au potentiel de la plante. Nous considérons qu'à ce stade, une zone à faible potentiel ne pourra plus valoriser une forte dose d'azote.

Agrorendement s'applique spécifiquement aux cultures suivantes :



Blé : au stade du tallage (T1), au stade de l'apparition de l'épi de 1 cm (T2), au stade de deux nœuds (2N) et au stade DFE.



Orge : au stade de l'apparition de l'épi de 1 cm et au stade de la fin de montaison.



Colza : 2 passages en sortie d'hiver.

Grâce à AGRORENDEMENT, les agriculteurs peuvent bénéficier de recommandations précises et adaptées à chaque stade de croissance de leurs cultures, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation des ressources tout en favorisant des rendements homogènes et une meilleure qualité des récoltes.

PHYTOPROTECH (annexe 3) est un outil spécialisé dans la gestion du risque phytosanitaire. Sa fonction principale est de calculer des courbes d'infection et de déterminer le moment précis où une maladie peut apparaître dans une parcelle agricole. Lorsque les conditions sont propices au développement de la maladie, les logiciels de PHYTOPROTECH alertent l'agriculteur sur le meilleur moment pour appliquer un traitement, permettant ainsi de n'intervenir qu'en cas de réelle nécessité.

Grâce à ses fonctionnalités avancées, PHYTOPROTECH offre aux agriculteurs une approche proactive dans la lutte contre les maladies des cultures. En analysant les données météorologiques, les caractéristiques du sol et d'autres facteurs pertinents, l'outil établit des prévisions précises sur l'évolution des infections, la réduction de l'utilisation excessive de produits phytosanitaires et la minimisation des impacts environnementaux.

L'avantage majeur de PHYTOPROTECH réside dans sa capacité à optimiser l'efficacité des traitements phytosanitaires. En évitant les traitements préventifs systématiques, l'outil permet de réduire les coûts associés aux produits chimiques, tout en préservant la santé des cultures. En agissant de manière ciblée et précise, les agriculteurs peuvent minimiser les risques de développement de résistances aux produits phytosanitaires, assurant ainsi une protection durable des cultures.

Wanaka est aujourd'hui en partenariat avec différentes structures qui sont dans le domaine agricoles et de la télédétection pour faciliter l'interopérabilité des données. Dans le domaine de la Télédétection, l'entreprise est en partenariat avec EarthDaily, une structure spécialisée en commercialisation des données de télédétection, qui lui donne accès à une base de données d'indices et d'images satellites. Dans le domaine agronomique, Wanaka est en partenariat avec BE API pour les données de potentiel de sol, avec FIELDVIEW, GEOFOLIA, WIUZ et SMAG pour la saisie des parcelles et de leurs informations.

Chez WANAKA, l'innovation occupe une place centrale dans la stratégie de l'entreprise. La structure s'engage à accompagner les acteurs de l'agro-industrie tels que les semenciers, les coopératives, les industriels, les négoce et les chambres d'agriculture en leur fournissant des solutions de classification et de suivi de leurs essais expérimentaux grâce à l'imagerie spatiale.

En combinant la technologie et l'espace au service de l'agriculture, Wanaka aide les clients à justifier de manière adéquate leurs actions sur le terrain et à privilégier une approche respectueuse de l'environnement, de la société et de la réglementation.

Grâce à son expertise en imagerie spatiale, Wanaka propose des solutions personnalisées qui répondent aux besoins spécifiques des clients. Que ce soit pour évaluer l'efficacité de nouvelles variétés de semences, suivre l'évolution des cultures, identifier les problèmes de santé des plantes ou évaluer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement, les technologies avancées permettent une analyse approfondie et une évaluation précise.

En collaborant avec WANAKA, les clients bénéficient d'une approche holistique qui intègre les dimensions environnementales, sociétales et réglementaires. Le blé constitue la culture première dont l'entreprise intervient et produit du conseil.

### **I-2) Le blé en tant que culture clé sur le plan économique et alimentaire et justification de la nécessité de la fertilisation.**

L'une des cultures les plus importantes au monde, le blé constitue une culture clé en termes de production et de commerce. C'est une culture ancienne dont l'origine est généralement associée au Moyen-Orient, bien que cela reste un sujet de recherche ouvert pour les botanistes. Depuis des millénaires, cette céréale est cultivée et consommée par les populations à travers le monde. Sa large répartition géographique s'explique par sa capacité à s'adapter à différents climats, bien que les régions tempérées avec des régimes de pluie réguliers soient davantage propices. Le blé a ainsi su prospérer dans des environnements variés grâce à ses caractéristiques adaptatives (Abis, 2015). La particularité de cette culture est que des moissons existent sur la terre tout au long de l'année selon des calendriers différents. Son importance et son niveau mondial font d'elle parmi les cultures agricoles qui connaît le plus d'améliorations agronomiques au fil des générations. La hausse de sa production au cours des décennies : 50 Mt dans les années 1880 contre 700 Mt aujourd'hui et les estimations montrent que nous serons à 900 Mt en 2050 (Abis, 2015).

Céréale la plus connue, le blé fait partie du genre « Triticum ». Parmi ces milliers de variétés les deux principalement utilisées sont le blé dur (*Triticum durum*) et le blé tendre (*Triticum aestivum*).



Le blé dur, qu'il soit entier ou partiellement concassé, est utilisé dans la production de divers produits tels que la semoule, le boulgour, le pilpil, les grains et une variété de pâtes, qu'elles soient complètes ou raffinées. Les blés de cette catégorie sont facilement reconnaissables grâce à leur belle couleur jaune, leurs épis compacts avec des barbes (pointes effilées sur les épis) relativement longues, et la dureté de leurs albumens, qui est le tissu de réserves nutritives de la graine. Ils sont également riches en protéines et contiennent des acides aminés essentiels (Charvet, 2023).

Le blé tendre est spécifiquement utilisé pour la production de farine, qui à son tour est utilisée pour la fabrication de pains (panification) et de produits de biscuiterie tels que pâtisseries et viennoiseries. Ce blé se divise en trois catégories distinctes : le blé panifiable, le blé biscuitier et le blé fourrager. Les blés de cette catégorie présentent un albumen avec une texture plus ou moins farineuse, et ils peuvent être barbus ou non (contrairement au blé dur, qui est toujours barbu et est parfois surnommé blé barbu). Ils se distinguent par leur teneur élevée en gluten et en protéines. Il s'agit de la variété de blé la plus couramment cultivée (Charvet, 2023).

La figure ci-dessous est un exemple entre blé dur et blé tendre :



Figure 2 : Exemple de blé dur et de blé tendre



Étant une culture mondiale, sa demande reste élevée en raison de son utilisation (farine, pâtes, biscuits etc...). En conséquence, la productivité et la rentabilité de la culture restent cruciales pour l'économie agricole et la sécurité alimentaire tout en s'inscrivant dans le contexte climatique mondial. Les sols agricoles peuvent devenir déficients en éléments nutritifs y compris l'azote en raison de l'abatement des réserves naturelles et du ruissellement des éléments nutritifs des cultures précédentes. La fertilisation azotée permet de compenser ces carences et d'apporter aux plantes suffisamment d'azote. Cela favorise une croissance vigoureuse, une photosynthèse efficace et une meilleure utilisation des autres nutriments. Une fertilisation azotée appropriée contribue également à améliorer la qualité du grain de blé. L'azote joue un rôle important dans la formation des protéines, ce qui est essentiel pour la qualité du blé. Des niveaux d'azote adéquats favorisent des grains de blé nutritifs adaptés à la transformation en aliments de haute qualité. L'utilisation efficace de la fertilisation azotée contribue également à une gestion environnementale plus durable. Un apport bien équilibré des nutriments dont les plantes ont besoin évite le gaspillage et la surutilisation d'engrais et réduit le risque de contamination du sol et des eaux souterraines. Une fertilisation appropriée maximise l'efficacité de l'azote appliqué, minimisant ainsi les pertes par lessivage et volatilisation. En résumé, la fertilisation du blé est essentielle car elle est importante à la fois sur le plan économique et nutritionnel. La fertilisation azotée optimise les rendements, améliore la qualité des grains et contribue à une approche plus durable de l'environnement. Le développement d'une méthodologie de conseil sur la fertilisation azotée basée sur l'état végétatif issu de l'imagerie satellitaire et les données sur le potentiel du sol peut fournir aux agriculteurs des recommandations personnalisées sur la manière de maximiser les rendements tout en minimisant l'impact environnemental pendant toute la moisson du blé.

### I-3) Missions et tâches du stage

Mon stage s'est déroulé au sein de l'entreprise Wanaka. Pendant la période de stage, j'ai travaillé activement à la production de ces outils sur différentes cultures sur plusieurs régions de la France métropolitaine. Ma principale mission dans le cadre du stage était la production et la restitution des conseils de fertilisation en azote aux clients chaque jour selon leur planning c'est-à-dire de suivre les processus opérationnels des OAD pour traiter les commandes. Ma



principale mission dans le cadre du projet était de créer une méthode de conseil en fertilisation azotée qui rassemble des données satellitaires d'état végétatif et des données de potentiel de sol, tout en l'automatisant.

Mes tâches quotidiennes comprenaient :

- Effectuer la mise à jour de Tableau (outil de Data Visualisation permettant d'améliorer le flux des analyses et rendre les données plus accessibles) pour la récupération des nouvelles commandes à restituer ou faire des requêtes SQL à partir de la base de données MySQL,
- Faire le traitement des parcelles en générant des conseils pour le blé, colza et orge,
- Effectuer un contrôle qualité des conseils, en vérifiant les images utilisées en cas de problèmes sur les valeurs de biomasses pour la fiabilité des résultats,
- Valider et restituer les conseils aux clients selon les dates de restitutions exigées,
- Tenir au courant les clients par mail lorsque divers problèmes empêchent la bonne restitution d'un conseil (manque d'informations dans la commande, manque d'image, etc.),
- Assurer le suivi des commandes,
- Assurer le suivi des passages satellites afin de déterminer la prochaine date d'image disponible et ainsi décider de la date optimale pour le traitement des parcelles, en cas de manque d'images récentes,
- Réaliser des cartes de zonages de semis pour des demandes spécifiques.

Pendant toute la durée de mon stage, j'ai été principalement impliqué dans la recherche et le traitement d'images afin de calculer la dose d'azote à moduler pour des parcelles tests. Ces parcelles n'étaient pas uniquement situées en France, mais également dans d'autres pays, notamment en Roumanie. Cette expérience m'a permis d'élargir ma vision et d'appréhender des contextes agricoles différents.

Une des tâches qui m'a été assignée était de produire des cartes de modulation de la dose d'azote à appliquer en combinant à la fois le potentiel du sol et la biomasse calculée à partir des images satellitaires. Cela répondait à une demande spécifique de certains clients qui souhaitaient obtenir des recommandations de fertilisation plus précises et adaptées à leurs parcelles. Pour cela, j'ai utilisé des algorithmes de traitement d'images afin d'extraire les informations pertinentes liées à la biomasse des cultures. En combinant ces données avec les informations sur le potentiel du sol, j'ai pu générer des cartes de modulations d'azote qui indiquaient les zones nécessitant une dose plus élevée ou plus faible d'azote en fonction de leurs caractéristiques spécifiques.

Au cours de mon stage, j'ai pu acquérir une expérience concrète dans le domaine de l'agriculture de précision en travaillant avec des données précises et en contribuant activement à la production des outils d'aide à la décision de WANAKA. Cela m'a permis de développer mes compétences techniques, notamment en matière de traitement d'images et d'analyse de données agricoles, ainsi que de comprendre l'importance de la fiabilité des données satellites dans le processus de prise de décision en agriculture.



## II-) État de l'art des méthodes de conseils en fertilisation azotée du blé

### II-1) Les approches existantes en conseil de fertilisation azotée et leurs limites

L'azote joue un rôle crucial dans la production végétale. Présent en abondance à la surface de la Terre, notamment sous forme de  $N_2$  dans l'atmosphère, il ne peut être utilisé par la plupart des organismes vivants qu'une fois converti en formes réactives d'azote, telles que les nitrates ( $NO_3^-$ ) ou l'ammoniac ( $NH_4^+$ ). Seules les légumineuses sont capables d'accéder à des sources d'azote non réactives grâce à la fixation symbiotique. Dans le cas des plantes cultivées, la majorité d'entre elles dépendent des apports d'engrais et des réserves d'azote présentes dans le sol pour obtenir les formes réactives d'azote dont elles ont besoin (Fertisols, 2021). En moyenne, un sol cultivé contient environ 2 à 5 tonnes d'azote total par hectare dans sa couche supérieure, tandis qu'une prairie naturelle peut en contenir jusqu'à 10 tonnes. La majeure partie de cet azote est présente sous forme organique, mais il n'est pas immédiatement disponible pour les plantes (Fertisols, 2021).

La fertilisation azotée est une pratique agricole consistant à apporter des éléments nutritifs principalement de l'azote, au sol dans le but d'améliorer la croissance et le rendement des plantes. L'azote joue un rôle important dans la formation des protéines, des enzymes et d'autres composés nécessaires au développement des tissus végétaux (Sinaj *et al*, 2017).

L'importance de la fertilisation azotée a suscité différentes approches pour la préconisation de la dose d'azote nécessaire à apporter pour la plante en fonction des objectifs spécifiques de la culture et des pratiques agricoles. Parmi les approches, on a la méthode de recommandation basée sur des seuils, la méthode d'équilibre de la nutrition, les méthodes basées sur la télédétection, l'approche de gestion de la fertilité du sol, la méthode bilan etc.

#### - La méthode de recommandation basée sur les seuils :

Elle repose sur l'utilisation de seuils de rendement ou d'indices de nutrition des plantes pour évaluer les besoins en azote de la culture (Delgado, J. A., & Cabrera, M. L., 1995).

Pour cette approche, des échantillons sont prélevés dans les parcelles agricoles pour permettre de connaître le niveau d'azote déjà présent dans le sol tandis que les échantillons de végétation permettent d'évaluer la nutrition des plantes (Schepers, J. S., & Raun, W. R., 2008). Différentes méthodes d'analyse peuvent être utilisées, telles que l'analyse chimique pour mesurer les

niveaux d'azote dans le sol et l'analyse foliaire pour évaluer la concentration d'azote dans les tissus végétaux. À partir des données d'analyse, des seuils de rendement ou des indices de nutrition des plantes sont établis. Ces seuils sont des valeurs de référence qui indiquent les niveaux optimaux d'azote nécessaires pour atteindre les objectifs de rendement souhaités. Les seuils peuvent être basés sur des normes agronomiques, des modèles de croissance des cultures ou des recommandations spécifiques pour une culture donnée (Dobermann, A., & Cassman, K. G., 2002). Les niveaux d'azote disponibles dans le sol et les concentrations d'azote dans les tissus végétaux sont comparés aux seuils établis. Si les niveaux d'azote sont inférieurs aux seuils, cela indique un besoin d'apport supplémentaire d'azote pour optimiser le rendement de la culture. En fonction des résultats de l'analyse et de la comparaison avec les seuils, des recommandations d'apport d'azote sont formulées. Ces recommandations visent à ajuster les niveaux d'azote dans le sol en apportant des fertilisants azotés appropriés. Elles tiennent également compte des objectifs de rendement spécifiques de l'agriculteur, ainsi que des facteurs environnementaux tels que la disponibilité en eau, la température, le pH du sol, ... (Dobermann, A., & Cassman, K. G., 2002).

Cette méthode cache plusieurs limites. Les seuils de rendement ou les indices de nutrition des plantes utilisés peuvent varier en fonction des conditions locales, des variétés de cultures, des pratiques agricoles, etc. Il est donc important de disposer de seuils spécifiques à chaque situation agricole. La méthode repose sur des échantillons prélevés à un moment précis, ce qui peut ne pas refléter de manière précise les variations temporaires des besoins en azote des plantes. L'analyse des échantillons peut être coûteuse et nécessite une expertise en laboratoire. Cela peut limiter sa faisabilité pour de nombreux agriculteurs. Les facteurs environnementaux autres que l'azote peuvent également influencer la nutrition des plantes et le rendement des cultures. La méthode de recommandation basée sur des seuils ne prend pas en compte ces autres facteurs de manière explicite (Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. 2010).

- **La méthode d'équilibre de la nutrition :**

Elle cherche à équilibrer les besoins en azote avec ceux des autres éléments nutritifs essentiels, tels que le phosphore, le potassium et les oligo-éléments, pour assurer une croissance optimale, un rendement élevé et une qualité supérieure des cultures (Mengel & Kirkby, 2001).

Cette méthode repose sur l'idée que des niveaux équilibrés de nutriments sont nécessaires pour soutenir le développement harmonieux des plantes.

L'équilibre nutritionnel dans les cultures est essentiel car chaque élément nutritif joue un rôle spécifique dans le métabolisme des plantes (White & Broadley, 2012). Par exemple, l'azote est nécessaire à la formation des protéines, à la croissance des feuilles et à la couleur verte des plantes. Le phosphore est impliqué dans la photosynthèse, la respiration et la formation des fleurs et des fruits. Le potassium régule l'ouverture et la fermeture des stomates, favorisant ainsi l'absorption des autres éléments nutritifs et la régulation de la pression osmotique. Les oligo-éléments, tels que le fer, le zinc et le cuivre, sont nécessaires en quantités très faibles, mais jouent un rôle vital dans divers processus métaboliques.

L'approche d'équilibre de la nutrition vise à fournir aux plantes les éléments nutritifs dont elles ont besoin dans des proportions appropriées (Marschner, 2012). Cela nécessite une évaluation précise des besoins en éléments nutritifs de la culture spécifique, ainsi que de l'analyse des sols et de la qualité de l'eau d'irrigation. En utilisant ces informations, les agriculteurs peuvent ajuster les quantités et les ratios des engrais pour atteindre un équilibre optimal.

Cependant, il convient de noter que la méthode d'équilibre de la nutrition présente certaines limites. Tout d'abord, il est important de souligner que les besoins nutritionnels peuvent varier en fonction des différentes cultures, des conditions environnementales et des pratiques agricoles spécifiques. Par conséquent, il n'existe pas de formule unique qui puisse être appliquée universellement à toutes les cultures.

De plus, il peut être difficile d'obtenir des informations précises sur les besoins en éléments nutritifs des cultures, car ces besoins peuvent être influencés par de nombreux facteurs variables. Des études de recherche approfondies et des essais sur le terrain sont nécessaires pour établir des recommandations spécifiques pour chaque culture et chaque région (Epstein & Bloom, 2005).

#### - **Les méthodes basées sur la Télédétection :**

Les méthodes basées sur la télédétection sont largement utilisées pour évaluer l'état végétatif des cultures et estimer leurs besoins en azote. L'une des mesures les plus couramment utilisées est l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), qui permet d'évaluer la vigueur et

la densité de la végétation à partir des données satellites d'observation de la Terre (Rouse Jr. *et al.*, 1974) (Tucker, 1979).

L'indice NDVI est calculé à partir des réflectances dans le proche infrarouge (PIR) et dans le rouge (R) du spectre électromagnétique. La formule de calcul du NDVI est la suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \text{ (Jiang *et al.*, 2008).}$$

Les valeurs de l'indice NDVI varient de -1 à +1, où des valeurs élevées (proches de +1) indiquent une végétation dense et saine, tandis que des valeurs faibles (proches de -1) indiquent une faible couverture végétale ou une végétation stressée.

Pour estimer les besoins en azote des cultures, les mesures NDVI sont associées à des modèles de croissance des cultures. Ces modèles utilisent des relations empiriques entre l'indice NDVI et la biomasse végétale pour estimer la quantité d'azote requise par la culture (Mulla, 2013). En utilisant ces modèles, il est possible de déterminer les besoins en azote des cultures à différents stades de croissance et d'ajuster les recommandations de fertilisation en conséquence.

Cependant, les méthodes basées sur la télédétection présentent certaines limites. Tout d'abord, les données satellites peuvent être affectées par des conditions météorologiques, telles que la couverture nuageuse, qui peuvent réduire la qualité et la disponibilité des images. De plus, la résolution spatiale des images satellites peut limiter la précision des mesures, en particulier lorsqu'il s'agit de parcelles agricoles de petite taille. En outre, l'interprétation des mesures NDVI peut être influencée par d'autres facteurs tels que la présence de mauvaises herbes ou de maladies des cultures.

Malgré ces limites, les méthodes basées sur la télédétection offrent de nombreux avantages, notamment une surveillance à large échelle des cultures, la possibilité d'estimer les besoins en azote de manière non destructive et la fourniture d'informations en temps quasi réel. Elles sont devenues une approche précieuse pour la gestion agricole et la prise de décision en matière de fertilisation.

- **L'approche de la gestion de la fertilité du sol** (agroécologie) :

L'approche se concentre sur plusieurs techniques clés, notamment la rotation des cultures, la gestion des résidus de culture, l'utilisation de cultures de couverture et la gestion de la matière organique.

La rotation des cultures implique de cultiver différentes plantes dans une séquence régulière sur une même parcelle de terrain. Cette pratique présente plusieurs avantages, notamment la réduction de l'accablant des nutriments spécifiques, la prévention de l'accumulation de ravageurs et de maladies, et l'amélioration de la structure du sol (Tilman *et al.*, 2002). En alternant les cultures, les besoins en éléments nutritifs spécifiques sont mieux équilibrés, car différentes plantes ont des exigences différentes. Cela permet également de rompre les cycles de ravageurs et de maladies qui se développent sur une seule culture. Cependant, la rotation des cultures peut être difficile à mettre en œuvre dans certaines régions où les cultures spécifiques sont nécessaires pour répondre à la demande du marché. De plus, certaines cultures peuvent nécessiter des conditions de sol spécifiques, ce qui peut limiter les options de rotation dans certaines zones.

La gestion des résidus de culture implique l'utilisation et le traitement appropriés des parties de plantes restantes après la récolte, tels que les tiges, les feuilles et les racines. Ces résidus peuvent être incorporés dans le sol pour augmenter la matière organique, améliorer la structure du sol et favoriser la vie microbienne bénéfique (Lal, 2004). Cela permet de maintenir une fertilité à long terme en fournissant des éléments nutritifs aux cultures suivantes. Cependant, la gestion des résidus de culture peut être un défi dans certaines régions où l'accès à des machines ou équipements appropriés est limité. De plus, certains résidus peuvent être difficiles à décomposer rapidement, ce qui peut entraîner une accumulation excessive et potentiellement nuire aux cultures suivantes.

Les cultures de couverture sont spécialement cultivées pour couvrir et protéger le sol entre les périodes de culture principale. Elles aident à prévenir l'érosion, à supprimer les mauvaises herbes, à améliorer la rétention d'eau et à fixer l'azote atmosphérique dans le sol (Drinkwater *et al.*, 1998). Les cultures de couverture peuvent être des légumineuses, telles que les haricots ou les pois, qui fixent l'azote atmosphérique par le biais de symbioses avec des bactéries spécifiques présentes dans leurs racines. Cependant, le choix des cultures de couverture appropriées dépend des conditions environnementales et des objectifs agricoles spécifiques, ce qui peut rendre leur mise en œuvre complexe.

La gestion de la matière organique consiste à augmenter la teneur en matière organique du sol en ajoutant des amendements organiques tels que le compost, le fumier ou les résidus de

culture. Cela favorise l'activité biologique du sol, améliore la structure du sol et retient mieux l'eau et les éléments nutritifs (Poeplau & Don, 2015). L'augmentation de la matière organique permet également de stocker du carbone dans le sol, contribuant ainsi à atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'approvisionnement en matière organique peut être limité, en particulier dans les régions où l'accès aux amendements organiques est restreint. De plus, l'efficacité de la gestion de la matière organique peut dépendre de nombreux facteurs, tels que le type d'amendement utilisé, les pratiques de gestion et les conditions climatiques.

- **La méthode du bilan prévisionnel :**

Utilisée beaucoup plus en France, la méthode du bilan prévisionnel de l'azote est largement utilisée pour la gestion de la fertilisation azotée des cultures, conformément à la directive européenne sur la gestion des nitrates (91/676/CEE). Cette méthode a été initialement développée par Hébert en 1969 et Rémy-Hébert en 1974. Depuis lors, de nombreux travaux ont été réalisés pour améliorer et mettre à jour ses paramètres, et le COMIFER (Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée) est chargé de maintenir et de mettre à jour la méthode (Hébert, 1969 ; Rémy-Hébert, 1974).

La méthode du bilan prévisionnel estime les besoins en azote et les ressources disponibles entre deux dates clés : le semis de la culture (ou la fin de l'hiver pour les cultures d'automne) et la récolte (ou la fin de la période d'absorption pour certaines cultures). Elle repose sur la mesure du reliquat d'azote, qui quantifie la quantité d'azote minéral (nitrique et ammoniacal) disponible dans le sol pour la culture au début du cycle. Cette mesure du reliquat d'azote constitue le point de départ pour déterminer les apports en engrais azotés sur la culture (<https://comifer.asso.fr/>). Cependant, la méthode du bilan prévisionnel ne prend pas en compte les variations du potentiel de la culture en fonction des conditions climatiques et des stress biotiques. Ainsi, la dose totale prévisionnelle peut être sous-estimée ou surestimée. Pour améliorer l'efficacité des engrais azotés, il est recommandé de fractionner les apports d'azote, ce qui réduit les pertes par volatilisation, organisation. Dans ce contexte, l'utilisation d'un outil de pilotage permet de prendre en compte l'azote absorbé par la plante tout au long de sa croissance et d'évaluer son état de nutrition azoté à un instant donné, afin d'ajuster la dose totale à apporter. Ainsi, le raisonnement de la dose totale prévisionnelle combiné au fractionnement des apports à l'aide d'un outil de pilotage permet d'optimiser l'efficacité des engrais azotés.



Différents outils sont disponibles pour calculer la dose totale, choisir les doses, les stades et les périodes de fractionnement. Pour le calcul de la dose totale, les Groupes Régionaux d'Experts Nitrates développent (GREN) mettent à jour les références basées sur la méthode du bilan prévisionnel.

Le pilotage de la fertilisation azotée consiste à réévaluer la dose totale prévisionnelle en fonction du suivi du statut de nutrition azotée et/ou de la biomasse de la plante tout au long de son cycle de croissance. Pour les céréales, cela repose sur la mise en réserve d'une partie de la dose totale calculée avec la méthode du bilan, suivie d'un diagnostic de la quantité de biomasse et de la teneur en azote des plantes au début de la montaison.

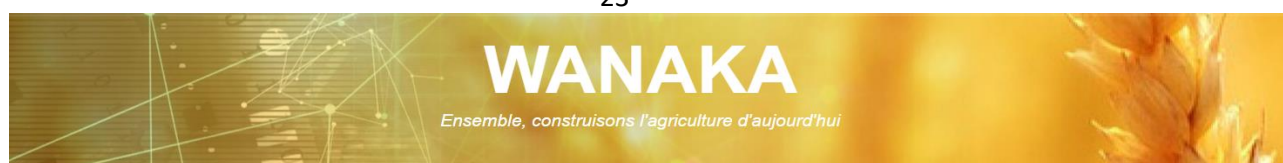
L'estimation de la teneur en azote des plantes peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes, telles que la mesure de la teneur en azote du jus de bas de tige ou la mesure de la teneur en chlorophylle par le biais de capteurs sur différents vecteurs (piéton, satellite, avion, drone ou engin agricole). De même, la mesure de la biomasse peut être effectuée par prélèvement et pesée ou estimée à l'aide de modèles basés sur des images.

Les variables telles que la quantité de biomasse et la teneur en azote des parties aériennes permettent de calculer la quantité d'azote restante à apporter pour atteindre un état de nutrition azoté satisfaisant. Cette quantité peut différer de la quantité d'azote mise en réserve initialement. En complément du pilotage, la modulation de la dose intra-parcellaire consiste à apporter des doses différentes à l'intérieur d'une parcelle en fonction des hétérogénéités observées, telles que la fertilité variable du sol, les problèmes de levée des cultures ou la présence de ravageurs. Il est important de noter que les outils mesurant uniquement un indice de végétation, comme l'indice de végétation NDVI, permettent de réaliser une modulation, mais ne fournissent pas un diagnostic précis de la nutrition azotée.

Voici un tableau de synthèse pour les avantages et les inconvénients des méthodes.

*Tableau 1 : Tableau de synthèse des méthodes*

Méthode	Avantages	Inconvénients
Méthode de recommandation basée sur les seuils	- L'utilisation de seuils de rendement ou d'indices de nutrition des plantes pour	- Les seuils de rendement ou les indices de nutrition des plantes utilisés peuvent changer en fonction des



	<p>évaluer les besoins en azote des cultures.</p>	<p>conditions locales, des variétés de cultures, des pratiques agricoles, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les échantillons prélevés ne reflètent qu'un moment précis et peuvent ne pas prendre en compte les variations temporaires des besoins en azote des plantes.</li> <li>- L'analyse des échantillons peut être coûteuse et nécessite une expertise en laboratoire.</li> <li>- Elle ne prend pas en compte les autres facteurs environnementaux qui peuvent influencer la nutrition des plantes et le rendement des cultures.</li> </ul>
Méthode d'équilibre de la nutrition	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vise à équilibrer les besoins en azote avec ceux des autres éléments nutritifs essentiels.</li> <li>- Favorise une croissance optimale, un rendement élevé et une qualité supérieure des cultures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les besoins nutritionnels peuvent varier en fonction des différentes cultures, des conditions environnementales et des pratiques agricoles spécifiques.</li> <li>- Nécessite une évaluation précise des besoins en éléments nutritifs de la culture spécifique et des conditions du sol.</li> </ul>
Méthodes basées sur la télédétection	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet une surveillance à large échelle des cultures.</li> <li>- Estimation des besoins en azote de manière non destructive.</li> <li>- Fournit des informations en temps quasi réel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les données satellites peuvent être affectées par des conditions météorologiques, réduisant ainsi la qualité et la disponibilité des images.</li> <li>- La résolution spatiale des images satellites peut limiter la précision des</li> </ul>



		<p>mesures, en particulier pour les petites parcelles agricoles.</p> <p>- L'interprétation des mesures peut être influencée par d'autres facteurs tels que la présence de mauvaises herbes ou de maladies des cultures.</p>
Approche de la gestion de la fertilité du sol	<p>- Utilise plusieurs techniques pour améliorer la fertilité du sol, telles que la rotation des cultures, la gestion des résidus de culture, l'utilisation de cultures de couverture et la gestion de la matière organique.</p> <p>- Favorise une fertilité à long terme et une utilisation efficace des éléments nutritifs.</p>	<p>- La mise en œuvre de certaines pratiques peut être difficile dans certaines régions ou avec certaines cultures.</p> <p>- Peut nécessiter des équipements spécifiques et des connaissances techniques.</p> <p>- Les effets peuvent prendre du temps pour se manifester et peuvent varier en fonction des conditions spécifiques.</p>
Méthode du bilan prévisionnel de l'azote (utilisée en France)	<p>- Estimation des besoins en azote et des ressources disponibles entre deux dates clés.</p> <p>- Utilisation du reliquat d'azote pour déterminer les apports en engrais azotés.</p> <p>- Répond aux exigences de la directive européenne sur la gestion des nitrates.</p>	<p>- Ne prend pas en compte les variations du potentiel de la culture en fonction des conditions climatiques et des stress biotiques.</p> <p>- Peut surestimer ou sous-estimer les doses d'engrais azotés.</p> <p>- Nécessite une mise à jour régulière des paramètres pour améliorer sa précision.</p> <p>- Peut nécessiter une utilisation d'outils de pilotage supplémentaires pour ajuster les doses en fonction de l'état de nutrition azoté des plantes.</p>

## II-2) Présentation de la méthode classique de conseil en fertilisation utilisée par Wanaka

Le modèle classique de Wanaka s'appuie sur des données de Télédétection et d'agronomie pour établir un conseil en fertilisation azotée. Pour ce faire, il a besoin d'un Indice de Leaf Area Index (LAI) et de la bande Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP) de la dernière image récente de la parcelle afin de calculer la biomasse et de l'azote absorbé et critique de la plante afin de préconiser une dose d'azote à apporter (figure 3).

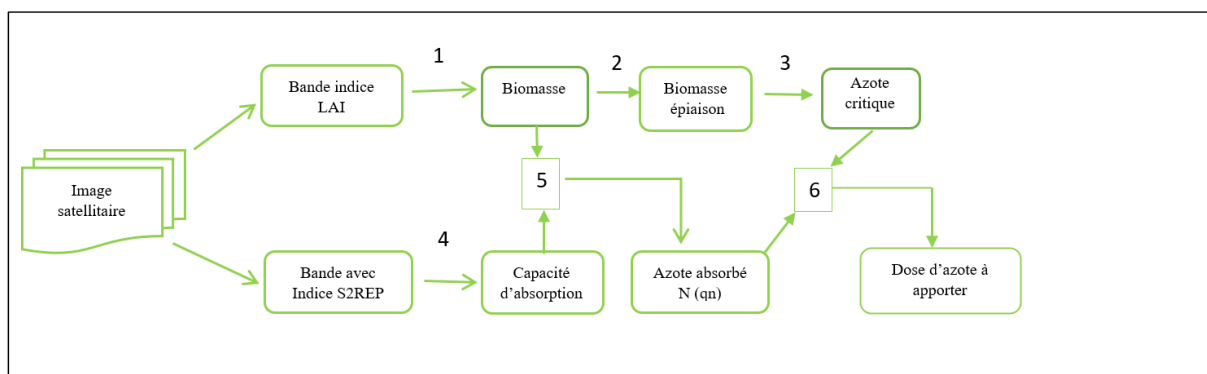


Figure 3 : Méthodologie pour calculer la dose d'azote à apporter

1 : Calcul de la biomasse (t/ha) :  $1.3788 * LAI + (-0.7741)$

2 : Calcul de la biomasse épiaison (t/ha) :  $5.19 + Biomasse * 0.45$

3 : Calcul de l'azote critique (kgN/ha) :  $10 * Biomasse \text{ épiaison} ^{5.19} * bq / 3 * Biomasse \text{ épiaison} ^{0.45}$

4 : Calcul de la capacité d'absorption (kg/N) :  $117.5821 + (-0.1576) * S2REP$

5 : Calcul de la quantité d'azote absorbé : (kgN/ha) :  $10 * Capacité \text{ d'absorption} * Biomasse$

6 : Calcul de la dose d'azote à apporter (kgN/ha) :  $Azote \text{ Critique} - Quantité \text{ d'azote absorbé}$

**NB : les formules de calcul sont issues du modèle développé par Wanaka.**

Ce processus de calcul commence par le téléchargement des données, à savoir des images satellitaires, via l'outil interne Swagger, qui est lié à l'API d'EarthDaily. Ces images sont composées de deux bandes : l'indice de surface foliaire (LAI) et S2REP. Elles ont été préalablement traitées par EarthDaily, une entreprise spécialisée dans le traitement et la commercialisation des données de télédétection, en partenariat avec Wanaka.

Les valeurs d'épiaison, le stade de conseil et le besoin qualité (bq) sont définis. Le bq représente le besoin unitaire en azote pour atteindre un rendement et une teneur en protéines optimaux. Selon le modèle classique de Wanaka, basé sur des travaux de terrain, les valeurs d'épiaison sont déterminées en fonction de la biomasse moyenne de la parcelle. Des valeurs minimales et maximales sont fixées en fonction de cette biomasse moyenne. Ces valeurs maximales et minimales servent de seuils pour déterminer la perte de valeur nutritionnelle entre le début et la fin de l'épiaison.

Le stade de conseil, ici le stade dernière feuille étalée (DFE), est indiqué. C'est à ce stade que les feuilles contribuent à 65% du rendement et peuvent être efficacement protégées (BASF, 2023). Le bq est défini en fonction de la variété de blé, chaque variété ayant son propre bq spécifique selon le stade de développement.

Après cette étape de paramétrage agronomique, les données sont traitées sur QGIS. Tout d'abord, la biomasse et la biomasse moyenne sont calculées à partir de l'indice de surface foliaire (LAI). La biomasse moyenne permet de déterminer les seuils d'épiaison, ce qui permet ensuite de calculer la biomasse moyenne à l'épiaison. Ensuite, la quantité d'azote absorbé (qn) est calculée à partir de la bande S2REP.

En combinant les valeurs de la biomasse à l'épiaison et de l'azote absorbé, les valeurs d'azote critique sont obtenues. L'azote critique correspond à la quantité totale d'azote nécessaire à la plante à l'épiaison pour un développement optimal. C'est la quantité d'azote que la plante doit absorber pour atteindre un maximum de biomasse (Lemaire *et al.*, 1997).

Enfin, la dose d'azote à appliquer sur la parcelle est calculée en soustrayant la quantité d'azote absorbé (qn) à l'azote critique, ce qui permet d'obtenir un raster avec les pixels représentant la dose d'azote à apporter.

Après nous passons à une classification (3 à 5 classes selon la demande du client par la méthode de Jenks). Voici un exemple de conseil classique de Wanaka :

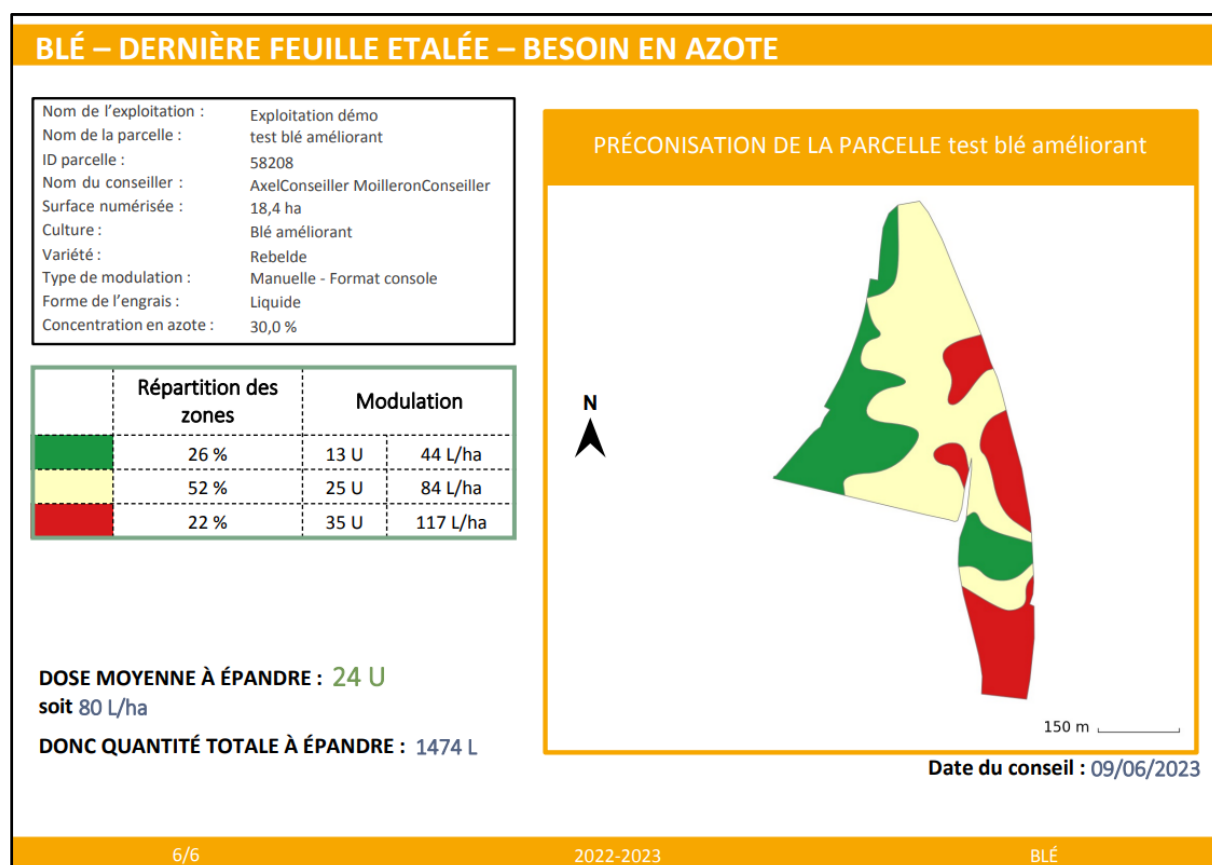


Figure 4 : Exemple de conseil Wanaka

La figure 4 constitue un exemple de conseil de la méthode classique de Wanaka. Sur cette image, on a la description de la parcelle, la concentration en azote, la dose moyenne à épandre en U et la quantité à épandre en Liquide. On a aussi un support visuel de la parcelle avec les différentes zones et leur dose ainsi que leur pourcentage de superficie par rapport à la parcelle. La principale limite de cette méthode classique repose sur la répartition de la biomasse, elle ne tient pas compte d'autres paramètres comme le potentiel de sol.

### II-3) Un besoin d'améliorer la méthode classique de Wanaka

La méthode classique de Wanaka basée sur la répartition de la biomasse, malgré son importance, cache des limites. La biomasse peut varier pour diverses raisons, notamment les pratiques de gestion, la biodiversité et les perturbations naturelles. Cette variabilité peut rendre difficile la généralisation des résultats pour des zones similaires. La biomasse seule peut ne pas fournir une image complète de l'état de l'écosystème. D'autres facteurs, tels que la santé des

plantes, les interactions écologiques et les caractéristiques du sol, peuvent être négligés. La collecte précise de données sur la biomasse peut être complexe et coûteuse, et les erreurs de mesure peuvent influencer les résultats de manière significative. La répartition de la biomasse peut être influencée par des facteurs complexes et interconnectés. Les modèles basés uniquement sur la biomasse peuvent avoir du mal à capturer ces interactions. La répartition de la biomasse ne tient pas compte des conditions environnementales qui affectent directement la capacité de croissance des plantes, tels que les niveaux de nutriments dans le sol, la disponibilité de l'eau et les caractéristiques physico-chimiques du sol.

Améliorer cette méthode classique basée sur la répartition de la biomasse en utilisant l'état végétatif et le potentiel du sol peut offrir plusieurs avantages et surmonter ces limites. Voici les avantages pour l'amélioration de cette méthode en combinant le potentiel de sol et de l'état végétatif de la parcelle.

L'état végétatif d'une zone et le potentiel du sol fournissent des informations plus détaillées sur la santé des écosystèmes. Ces facteurs reflètent les conditions actuelles et la capacité de la zone à soutenir la croissance végétale, ce qui peut être plus précis que de se fier uniquement à la répartition de la biomasse. L'état végétatif et le potentiel du sol peuvent varier au fil du temps en réponse aux changements climatiques, aux saisons et aux pratiques de gestion. En prenant en compte ces variations, la méthode peut offrir une perspective plus dynamique de l'évolution de l'écosystème.

En se concentrant sur l'état végétatif et le potentiel du sol, la méthode peut mieux s'adapter aux types d'écosystèmes variés en prenant en compte les caractéristiques spécifiques à chaque environnement.

Les méthodes basées sur la biomasse et celles basées sur le sol sont deux principaux moyens de faire les conseils, et chacun comprend un certain nombre de client et de parcelles. Le fait d'être en partenariat avec une structure qui fait des conseils via le sol (exemple BE API leader dans le domaine), permet à Wanaka d'accéder à un grand nombre de parcelles. C'est donc également un outil pour s'introduire dans le marché des conseils par analyse de sol, et ainsi augmenter les parts de marché de l'entreprise, et son chiffre d'affaires.

## II-4) Importance de la combinaison de l'image satellite et potentiel de sol

Aujourd'hui, les progrès technologiques dans le domaine de l'imagerie satellitaire ont ouvert de nouvelles perspectives en matière d'observation terrestre. L'espace pour les satellites est désormais un observatoire idéal pour étudier les phénomènes naturels et les activités humaines, notamment l'agriculture. Cette évolution de la précision des images satellitaires a suscité un intérêt croissant de la part du secteur agricole, en raison notamment des objectifs de développement durable axés sur la protection de l'environnement et la sécurité alimentaire. Les informations satellitaires sont devenues essentielles pour l'agriculture, offrant une analyse fine des ressources et des sols exploités.

L'agriculture de précision englobe bien plus que l'optimisation des ressources et des intrants. Elle offre également une assistance précieuse pour la récolte et le guidage des engins agricoles. L'utilisation de dispositifs satellitaires garantit aux agriculteurs une couverture à 100 % pour des activités telles que le semis, l'irrigation et l'épandage phytosanitaire. En combinant ces dispositifs avec l'achat de prévisions météorologiques précises, l'agriculture de précision offre encore davantage d'améliorations en termes de production. La consolidation de l'imagerie satellitaire et du potentiel des sols joue un rôle important dans la précision et la fiabilité des informations sur les sols.

Le potentiel de sol, issu des mesures physiques, chimiques, et biologiques de la matière organique du sol, constitue la base de la fertilité, de la production agricole (capacité du sol à soutenir la croissance). Son évaluation est essentielle pour une gestion durable des terres. En comprenant les caractéristiques des sols, leur capacité de rétention d'eau, leur résistance à l'érosion, etc., il est possible de mettre en place des pratiques agricoles et de gestion des terres adaptées, réduisant ainsi l'épuisement des sols et la dégradation des terres (FAO, 2015).

Il permet aussi une prévision de certains risques naturels. Les propriétés des sols, telles que leur perméabilité, leur stabilité et leur capacité de rétention d'eau, jouent un rôle important dans la prévision et la gestion des risques naturels tels que les glissements de terrain, les inondations, etc. L'évaluation du potentiel de sol contribue à une meilleure compréhension de ces risques et à la prise de mesures préventives (Galli *et al.*, 2016).

L'imagerie satellitaire permet de faire l'analyse intra parcellaire grâce à la résolution spatiale et une surveillance des cultures grâce à la résolution temporelle. L'amélioration de la

résolution spatiale et temporelle, l'identification des propriétés des sols et la surveillance des changements environnementaux sont autant de contributions de la consolidation de l'imagerie satellite.



### III-) Réalisations techniques : conception et automatisation d'une nouvelle méthode de conseil en fertilisation azotée

Dans cette section, nous allons présenter les données utilisées ainsi que la méthodologie mise en œuvre pour mener notre étude. Nous commencerons par décrire les différentes sources de données que nous avons utilisées à savoir les données satellitaires d'états végétatifs et les données potentiel de sol, de plus nous aborderons l'automatisation.

#### III-1) Présentation des données utilisées

Cette partie présente les données utilisées dans la méthode de préconisation de la fertilisation azotée du blé. Ces données comprennent des données satellitaires sur les conditions de la végétation et des données sur le potentiel du sol. En combinant ces deux sources d'information, nous pouvons développer une approche pour recommander les dosages optimaux d'azote aux agriculteurs.

##### III-1-1) Données satellitaires d'états végétatifs.

Selon la commission des sciences et techniques spatiales, « une donnée satellite est une donnée obtenue à partir des instruments faisant partie de la charge utile d'un satellite ». C'est une information recueillie à partir des capteurs ou instruments embarqués à bord des satellites qui sont en orbite autour de la terre. Ces derniers sont conçus pour la collecte de données sur différents aspects (météo, environnement, ressources naturelles, caractéristiques terrestres, navigation ...). Les informations variables et précieuses que fournissent les données satellitaires nous permettent d'avoir le maximum de précision sur la santé des cultures. Les capteurs embarqués sur les satellites capturent la réflexion de la lumière solaire par la végétation et permettent de quantifier des indices de végétation tels que le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), le LAI (Leaf Area Index) ainsi la bande spectrale que S2REP (Sentinel-2 Red Edge Position) de Sentinel 2. Ces deux données (LAI et S2REP) seront utilisées avec des valeurs agronomiques pour établir des conseils. Ces données indiquent l'état de croissance des plantes et l'activité photosynthétique. Cela nous permet de suivre l'évolution de la biomasse végétale dans le temps et de détecter les différences spatiales dans les performances des plantes. Les données satellitaires sur l'état nutritionnel sont donc une source précieuse d'informations



pour évaluer la santé des plantes de blé et estimer les besoins en fertilisation azotée. Dans notre cas d'étude les données sont fournies par la structure EarthDaily. L'image reçue est constituée de deux bandes : une bande avec le LAI et une bande avec le S2REP. Ces données sont issues en priorité des images du satellite de Sentinel 2 et en cas d'indisponibilité d'images de ce satellite, on utilise les images de Landsat 8/9 de la mission Landsat.

### III-1-2) Données de potentiel de sol

Le potentiel du sol est un facteur important pour la fertilité et la productivité des cultures, en particulier le blé. Il décrit la capacité du sol à fournir les éléments nutritifs dont il a besoin, à retenir suffisamment d'eau, à fournir des structures favorables à la croissance des racines et à favoriser la santé globale du sol. Les données sur le potentiel du sol fournissent des informations sur les propriétés physiques et chimiques du sol qui peuvent affecter la disponibilité des éléments nutritifs tels que l'azote. Ces données proviennent de diverses sources telles que des enquêtes sur le terrain, des analyses en laboratoire et des modèles prédictifs. Il s'agit notamment de paramètres tels que la composition du sol, le pH, la teneur en matière organique, la capacité de rétention d'eau et la teneur en éléments nutritifs. Ces informations permettent d'évaluer la capacité du sol à fournir de l'azote aux plantes et d'identifier les carences ou les excès qui nécessitent une fertilisation équilibrée. Les sols à haut potentiel ont une meilleure capacité à libérer les nutriments essentiels qui sont indispensables pour maximiser la production de blé. De plus, une excellente rétention d'eau permet aux plantes d'accéder à l'eau dont elles ont besoin pour leur croissance même en période de sécheresse. Une structure de sol bien développée favorise le développement des racines et l'absorption des nutriments tout en empêchant le compactage. De plus, un sol sain abrite une communauté diversifiée de microbes bénéfiques qui aident à décomposer la matière organique, à libérer les nutriments et à contrôler les agents pathogènes, réduisant ainsi le risque de maladies et de ravageurs. L'intégration du potentiel du sol dans les pratiques de conseil en matière de fertilisation azotée peut recommander des pratiques de gestion appropriées pour maximiser les rendements et assurer la durabilité de la culture du blé. Les données de potentiel de sol reçues par la structure sont sous le format de fichier shapefile.

### III-2) Méthodologie

Voici un schéma récapitulatif de la méthodologie complète :

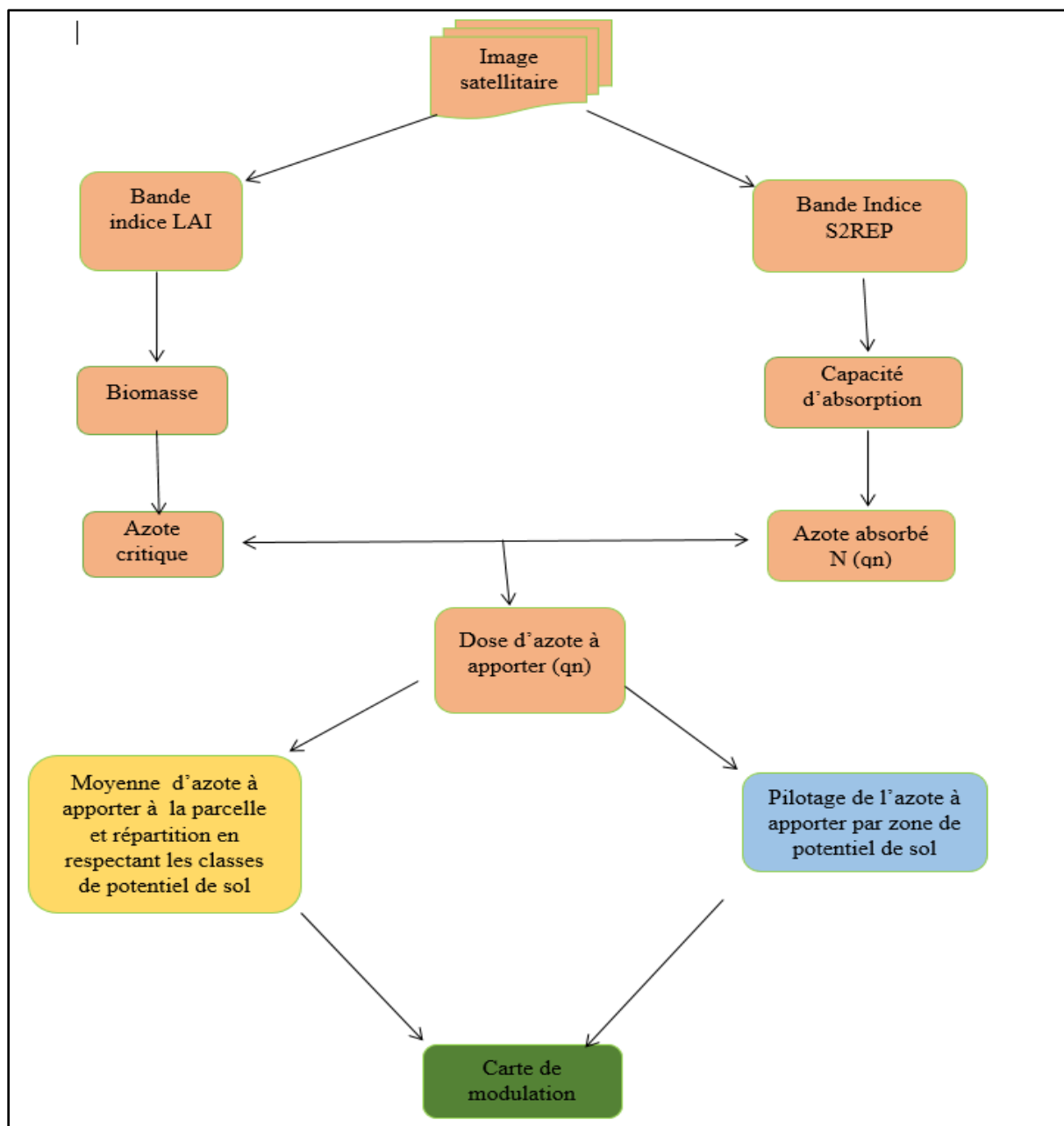


Figure 5 : Résumé méthodologie

Cette figure résume les différentes étapes pour la réalisation des conseils. D'abord une première partie pour le calcul de la dose d'azote (qn) avec les différentes étapes et bandes

d'entrées de rasters. Ensuite le moyennage de la dose d'azote par la méthodologie de la répartition par classes de potentiel de sol et le moyennage par pilotage de zone de potentiel.

Enfin la réalisation de la carte de modulation, c'est-à-dire la carte de préconisation de la dose d'azote.

Dans cette partie nous allons détailler la méthodologie utilisée ainsi que les différentes parties pour la collecte, le traitement des données.

L'entreprise WANAKA traite principalement des données issues de la télédétection pour élaborer des conseils en gestion et pilotage de la fertilisation azotée. Ces données (issues des images satellitaires) sont couplées avec des données agronomiques permettre d'optimiser les apports azotés ou engrais minéraux sur les grandes cultures (céréales et colza) des agriculteurs. Selon la demande et les partenariats pour mettre en place une méthode de conseils en fertilisation azotée, deux situations se présentent. Une première méthode consiste à utiliser le modèle développé par Wanaka (figure 3) pour calculer une dose moyenne à apporter à la parcelle. Puis cette dose moyenne à la parcelle est répartie en fonction de la classe de sol, de sorte de respecter l'ordre des classes de sol (répartition par zone de potentiel de sol). La zone qui a un potentiel de sol 1 a la dose la plus faible et la zone qui le potentiel le plus élève a la dose la plus forte. Une seconde méthode consiste à utiliser le modèle développé par Wanaka pour calculer directement une dose à apporter par zone de potentiel de sol (pilotage par zone), sans effectuer de répartition par classe de sol. Ainsi, une classe de sol au potentiel plus faible peut tout aussi bien avoir une préconisation plus faible qu'une classe de sol au potentiel plus élevée, ou avoir une préconisation plus élevée.

Pour ces deux situations la première partie de la méthodologie reste la même à savoir les traitements pour calculer la quantité d'azote à apporter.

### III-2-1) Méthodologie pour la répartition par classes de sol.

C'est méthodologie consiste à attribuer la dose moyenne de la parcelle aux différentes zones en fonction de leur potentiel et de leur superficie. La figure 6 montre les étapes pour la réalisation de ce conseil.



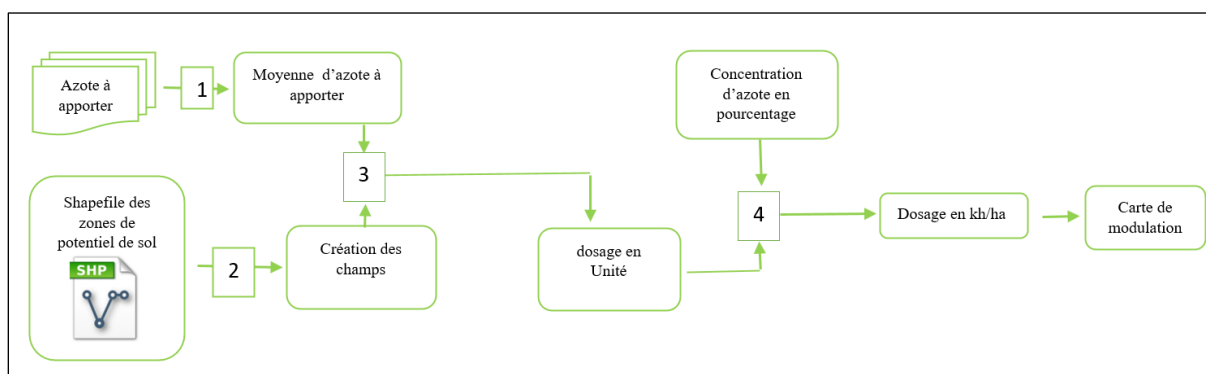


Figure 6 : Méthodologie par répartition par classe de sol

- 1 : calcul de la moyenne d'azote de la couche raster d'azote à apporter.
- 2 : Ajout des champs de la couche shapefile du potentiel de sol.
- 3 : Attribution d'une valeur d'azote préconisée pour chaque zone de potentiel de sol, par répartition de la moyenne calculée à la parcelle.
- 4 : Calcul de la dose en kg/ha selon la concentration : dose d'azote à apporter / concentration en azote et faire la carte de modulation pour le conseil.

Cette méthodologie consiste à répartir la dose moyenne d'azote à apporter de la parcelle, en fonction des zones de potentiel de sol de la parcelle. Cette répartition se fait selon une stratégie de renforcement (plus d'azote dans les zones de potentiel de sol élevé). Les valeurs de potentiel de sol peuvent aller de 1 à 5, et chaque parcelle est divisée en zones de potentiel de sol, allant de 1 à 5 zones de valeurs différentes. Un potentiel de 1 indique une zone plus faible en termes de rendement et un potentiel de 5 indique une zone plus forte. En plus de l'utilisation de la stratégie de renforcement, 3 règles sont utilisées pour réaliser les conseils, et ont été établies en discussion avec le partenaire. Une première règle impose qu'il y ait un écart de 10 unités entre chaque zone. Cet écart de 10 unités par zone constitue la limite opérationnelle pour les tracteurs (épandeurs), et il s'agit d'une règle de décision établie avec le partenaire pour déterminer la façon dont les doses sont réparties selon les zones. La deuxième règle impose de respecter une dose minimale de 5 unités pour une zone. Enfin, la dernière règle impose que la moyenne finale de dose à apporter à la parcelle, après répartition, soit égale à la dose moyenne préconisée à la parcelle par le pilotage Wanaka initial.

Cette méthodologie permet donc de répartir la dose d'azote à apporter en fonction du potentiel de sol de chaque zone de la parcelle, en prenant en compte les différentes classes de sol définies selon leur potentiel. Cela permet d'adapter l'apport d'azote en fonction des caractéristiques du sol, en mettant l'accent sur ces données terrain.

### III-2-2) Méthodologie pour pilotage par zone

Cette méthodologie consiste à attribuer la moyenne des unités d'azote par de zone. Pour ce se faire, après avoir rastériser la couche des zones de potentiels, on fait la statistique zonales de la couche raster pour avoir les moyennes de chaque zone qui seront les unités à préconiser. La figure 7 constitue les étapes pour la réalisation.

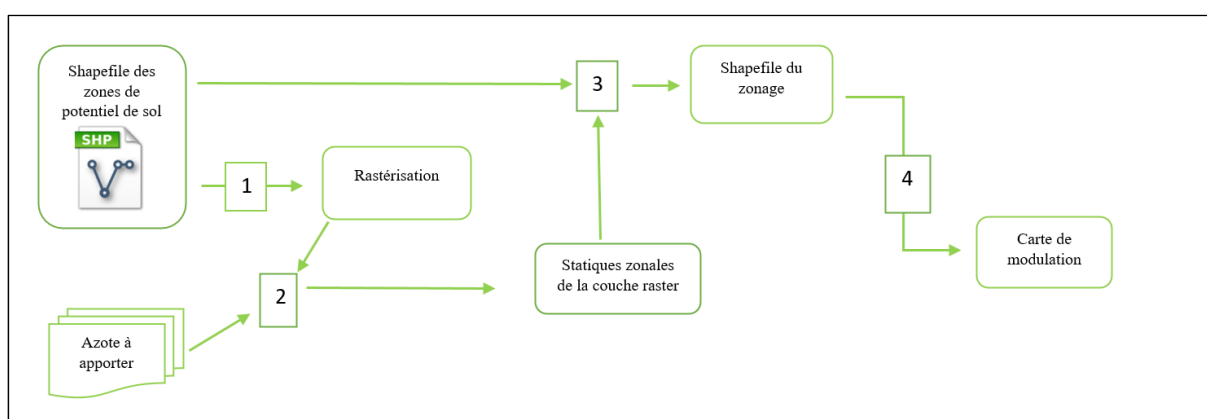


Figure 7 : Méthodologie par pilotage

- 1 : Conversion de la couche shapefile de la zone de potentiel de sol en une couche raster (.tif).
- 2 : Faire les statistiques zonales de la couche raster (.csv) pour avoir la moyenne par zone de potentiel de sol.
- 3 : Faire la jointure du fichier csv de la statistique zonales avec le shapefile des zones de potentiel de sol.
- 4 : faire la carte de modulation selon le champ de la moyenne pour le conseil en fertilisation azotée.

Cette méthodologie repose sur une approche de gestion de l'azote basée sur les moyennes de dose à apporter par zone. L'objectif est d'attribuer la dose appropriée en appliquant

le modèle de pilotage de Wanaka sur chaque zone de potentiel de sol plutôt que sur la parcelle entière. Cette approche met l'accent sur les données satellitaires en préconisant plus d'azote sur les zones où le développement végétatif est plus important, et ne respecte pas nécessairement la hiérarchie des classes de sol. Il est possible d'avoir une zone à faible potentiel de sol mais avec une dose préconisée élevée, et inversement. En résumé, cette méthodologie de pilotage par zone permet de calculer la dose d'azote appropriée pour chaque zone de sol.

L'importance de ces méthodes repose sur la combinaison de deux sources (scientifique et agronomique) de données c'est-à-dire l'état végétatif de la parcelle et de son potentiel de sol. Pour la répartition par classes de sol, l'avantage est d'avoir une moyenne sur l'ensemble de la parcelle qui sera ensuite répartie sur les zones de potentiel. L'inconvénient majeur de cette méthode est que la répartition doit aussi suivre la superficie des zones ce qui n'a pas une valeur scientifique. Pour le pilotage par zone de potentiel, l'avantage est d'avoir une moyenne de chaque zone ce qui respecte l'hétérogénéité de la parcelle. Son inconvénient est que la répartition de la dose ne suit pas la valeur de potentiel de sol de la zone.

En comparant ces deux méthodes à celle de Wanaka classique, on voit que ces deux méthodes constituent une amélioration dans la fertilisation azotée même si la méthode classique de Wanaka reste importante dans la mesure où elle se focalise sur la répartition de la biomasse pour fournir des doses d'azote à préconiser.

### III-3) Automatisation

Après la réalisation de cette méthodologie de travail sur Qgis, l'idée est de l'automatiser à travers un script python pour gagner du temps mais aussi pouvoir l'intégrer dans la plateforme WANAKA comme perspective. Comme annoncé dans la méthodologie, la première partie pour réaliser ce travail (calcul de la quantité d'azote à apporter ou à préconiser) est la même pour la répartition par classe de sol et pour le pilotage par zone (annexe 3). Donc on réalise un script qui nous permet de calculer la quantité d'azote à préconiser, un script permettant de faire le pilotage par zones de potentiel (annexe 4) et un script pour la répartition par classes de sol. L'idée de cette automatisation est dans un premier temps d'essayer de répondre rapidement au besoin des clients pour cette sollicitation à la fin de campagne et dans un second temps l'intégration du script dans la plateforme afin de l'utiliser pour les prochaines campagnes de manière automatique.

Les scripts présentent divers avantages tels que :

- Le gain de temps : exécution des tâches répétitives de manière automatique qui manuellement devaient prendre plus de temps. Grâce aux scripts, on a pu traiter des centaines de parcelles par jour en peu de minutes, ce qui nous prenait assez de temps (une dizaine de parcelles par jour) en passant par le logiciel Qgis.
- La réduction des erreurs : les oublis ou les saisies incorrectes effectuées par l'humain sont minimisés. De même, les erreurs liées à l'attribution de valeurs inexactes à une zone ou à la confusion entre les valeurs des différentes zones sont réduites.
- La constance et fiabilité : l'automatisation a garanti l'exécution cohérente et fiable des tâches, une conformité aux attentes.
- L'évolutivité : la facilitation de la mise en échelle des processus, le traitement d'une quantité importante de données (11382 ha pour Val de Gascogne et 311 ha pour Natup). La réutilisation du script pour d'autres tests au sein de l'entreprise.
- La productivité accrue : avec l'automatisation on a pu libérer du temps et mettre à disposition de manière rapide des conseils aux clients. Ce qui rajoute de la valeur ajoutée à l'entreprise pour la rapidité du traitement et se consacrer sur d'autres tâches.



- La réduction des coûts : c'est-à-dire une optimisation de l'utilisation de ressources. Vu les problèmes de bug et de lenteur qu'on rencontre avec certains logiciels, le script permet à la structure de minimiser les dépenses notamment avec l'achat des licences de logiciels payants pour leurs performances.



## IV-) Résultats et discussion

Dans cette partie, nous avons choisi de travailler sur deux parcelles, l'une pour la répartition par classes de sol et l'autre pour le pilotage par zone. Pour la répartition par classes de sol, la parcelle « 14 arpents jacques » a été choisie du distributeur NATUP et de l'exploitation « DU DOMAINE DE SANDRICOURT ». Cette parcelle se situe dans le département d'Oise dans la région Haut de France (figure 8). Pour le pilotage par zone, la parcelle « Canillac » a été choisie du distributeur Val de Gascogne de l'exploitation « MELIAN ». Cette parcelle se situe dans le département de Gers dans la région d'Occitanie (figure 8). Le choix de ces deux parcelles repose sur les deux différentes demandes (répartition par classes de sol et pilotage par zone) de ces deux distributeurs. Donc l'idée est de prendre pour chaque distributeur une parcelle dont le test sera fait.

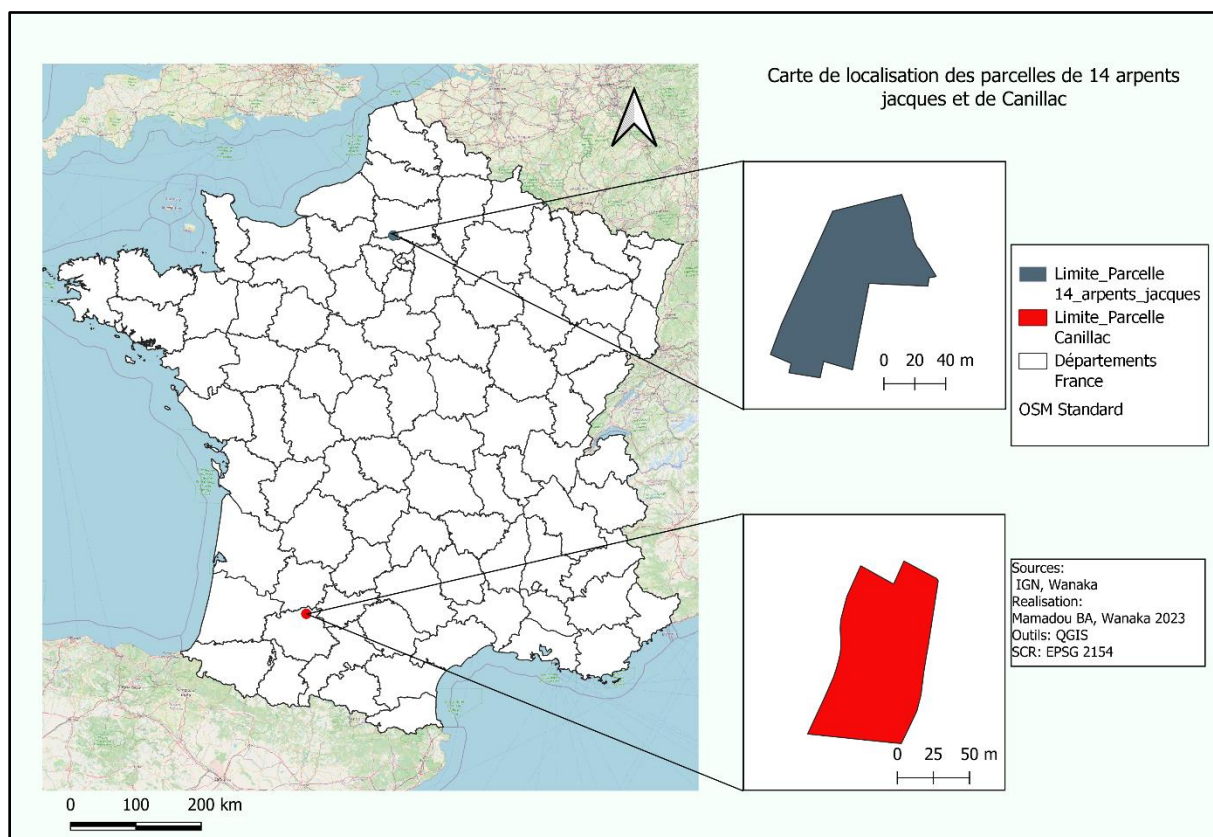


Figure 8 : Carte de localisation des parcelles tests

Ici nous avons la carte de localisation des parcelles choisies pour les tests. En couleur gris foncé, on a la parcelle 14 arpents jacques de superficie 3.88 ha du distributeur « Natup » et de l'exploitation « du domaine du Sandricourt ». La culture pour cette parcelle est le blé et le stade de conseil est la dernière feuille étalée (DFE). L'image satellitaire utilisée pour cette parcelle date du 18/04/2023. En couleur rouge nous avons la parcelle Canillac avec une superficie de 2.92 ha du distributeur « Val de Gascogne » et de l'exploitation « Melian ». La culture est le blé et le stade de conseil est aussi le DFE. La date d'image est le 15/04/2023.

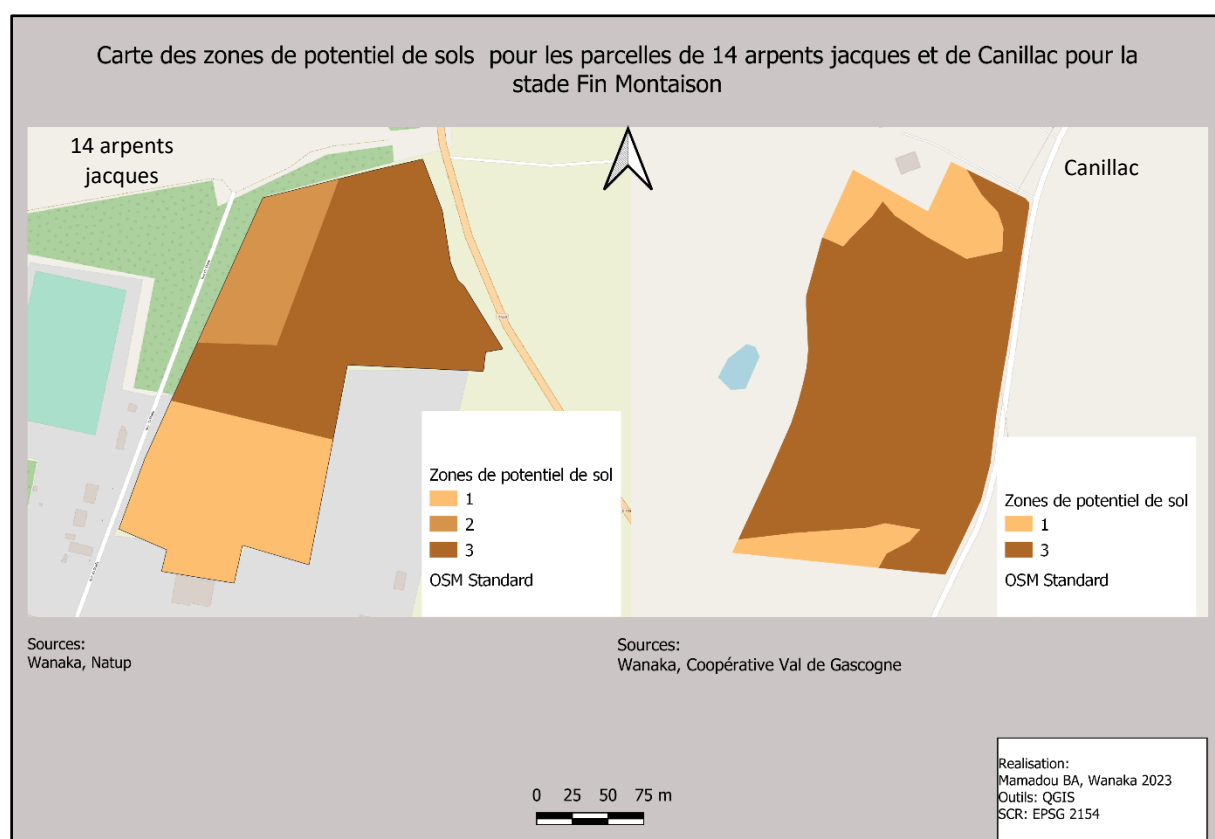


Figure 9 : Carte des zones de potentiel de sol

La figure 9 représente les cartes des zones de potentiel des deux parcelles. Le potentiel de sol se réfère aux propriétés essentielles d'un sol qui a un impact sur sa capacité à nourrir et à soutenir la développement des plantes. Il contient les conditions et les caractéristiques du sol qui peuvent accroître ou restreindre la productivité agricole. Pour la parcelle 14 arpent jacques,

nous avons trois zones de potentiel de sol allant de 1 à 3. La zone numéro 1 présente les conditions moins favorables à un développement de la production agricole tandis que la zone 3 est beaucoup plus favorable à accroître le développement de productivité agricole. La zone 2 constitue la zone intermédiaire. Pour la parcelle Canillac, nous avons deux zones de potentiel : une zone propice au développement de la production agricole et une zone moins favorable.

## IV-1) Résultats

### IV-1-1) Calcul de l'azote à apporter

Comme annoncé dans la méthodologie, le calcul de l'azote à apporter nécessite le traitement de différentes étapes à savoir le calcul de la biomasse, de la capacité d'absorption de la plante, de la quantité d'azote absorbé, de l'azote critique.

- Cartographie de la biomasse pour les deux parcelles :

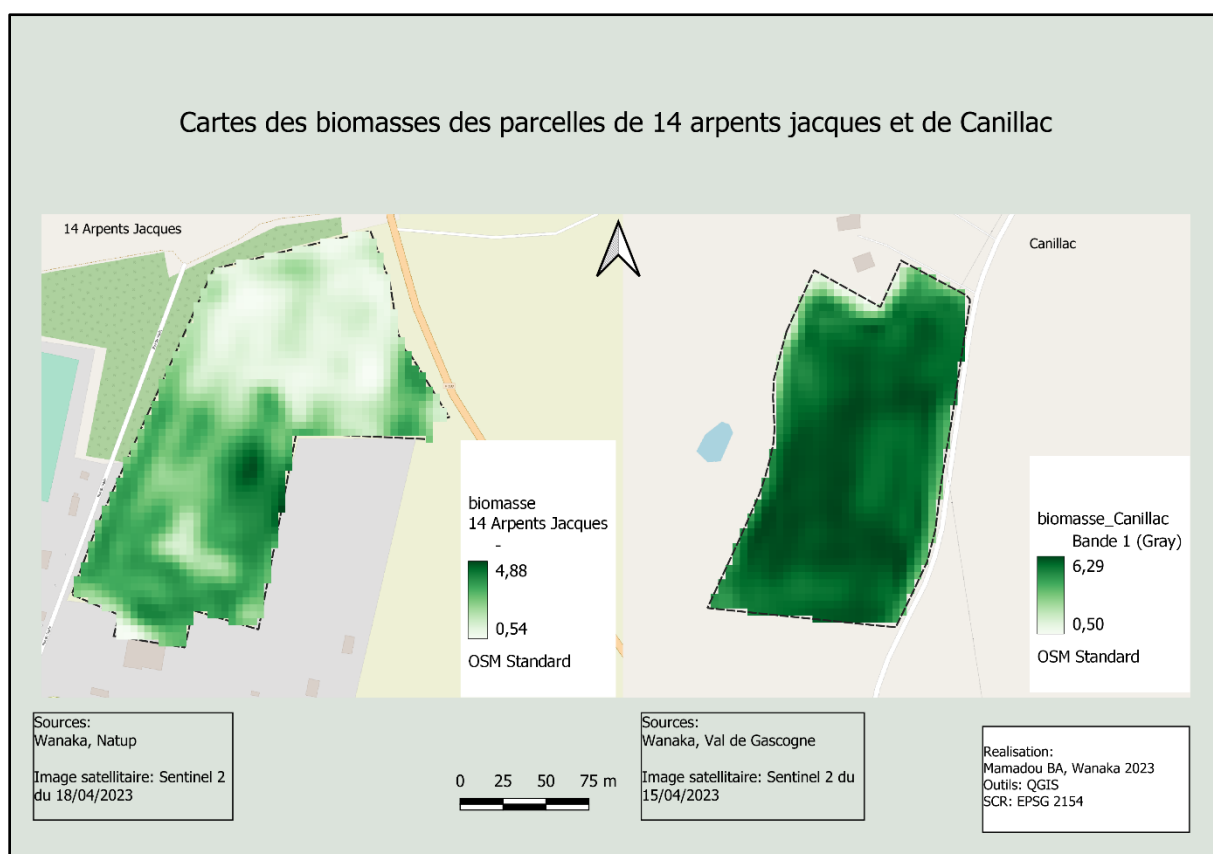


Figure 10 : Cartes des biomasses

Les cartes ci-dessus représentent la distribution spatiale de la biomasse végétale estimée à partir de l'indice foliaire (LAI). La plage de valeurs de la biomasse varie de 0.54 à 4.88 pour la parcelle 14 Arpents Jacques et 0.50 à 6.29 pour la parcelle Canillac, avec les valeurs minimales correspondant à une faible densité de biomasse et les valeurs maximales indiquant une densité de biomasse plus élevée. Ces valeurs sont données en tMS/ha de biomasse.

- Cartographie de la capacité d'absorption :

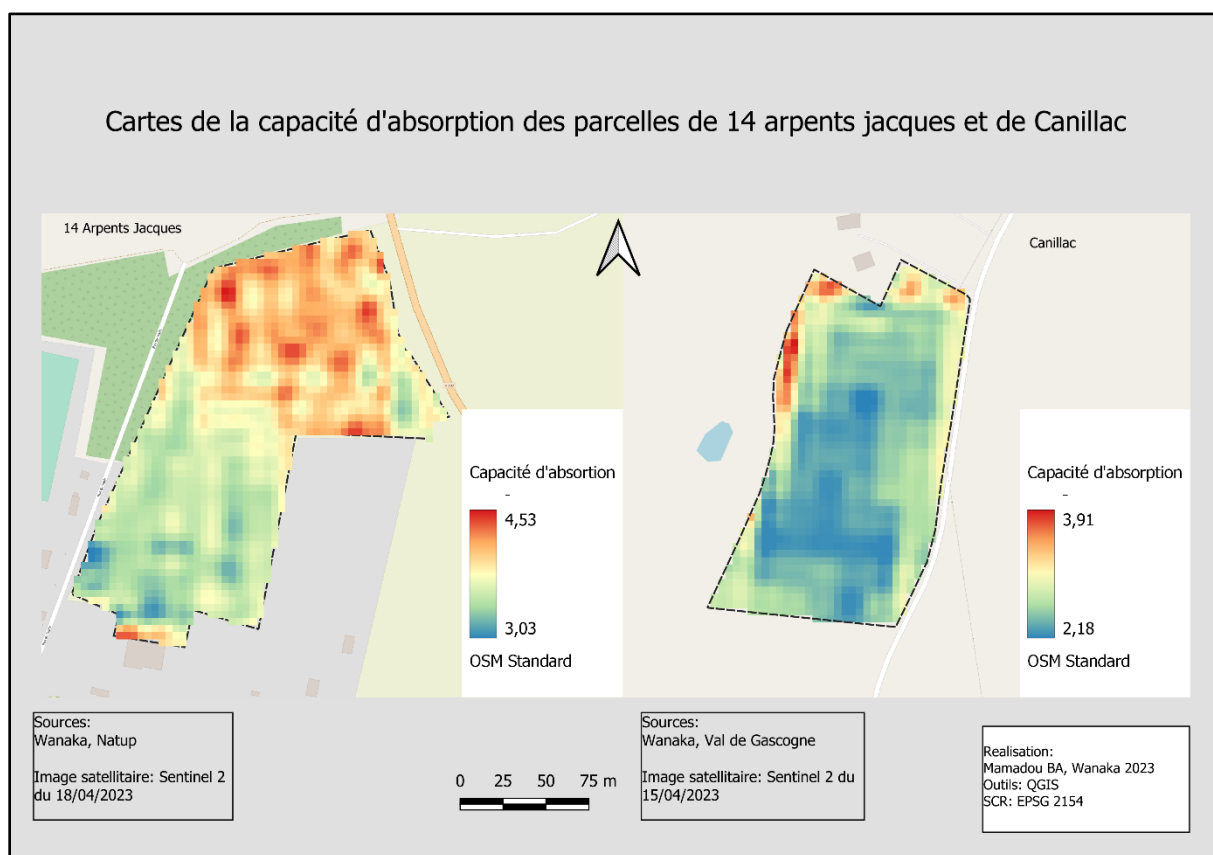


Figure 11 : Cartes de la capacité d'absorption

Les cartes ci-dessus représentent la quantité estimée d'azote absorbée par la végétation, en utilisant les données de réflectance de la bande S2REP. La capacité d'absorption de la plante varie spatialement sur la carte, avec des valeurs plus élevées indiquant une plus grande capacité d'absorption de l'azote par la végétation. Les valeurs de capacité d'absorption varient en fonction de

la densité de la végétation, de la santé des plantes et de l'apport en azote disponible dans l'environnement. La capacité d'absorption nous fournit des informations sur la quantité d'azote que la végétation peut absorber. Il s'agit du modèle agronomique. L'indice S2REP utilisé pour calculer la capacité d'absorption, correspond globalement à la quantité de chlorophylle de la plante. Au stade fin de montaison du blé (on est dans ce stade au moment du DFE), la plante entre en sénescence, ce qui signifie que l'activité photosynthétique ralentit (mais par défaut le S2REP continue d'augmenter même si l'activité ralentit), et le modèle a une relation inversement proportionnelle au S2REP par conséquent. La carte de capacité d'absorption se trouve inversée par rapport à la carte de biomasse, c'est la sénescence qui explique cela. Une biomasse plus élevée est corrélée à un taux de chlorophylle plus élevé, et donc à un S2REP plus élevé, et celui-ci étant inversement proportionnel à la capacité d'absorption à DFE, on retrouve bien une tendance inverse entre la biomasse et la capacité d'absorption à DFE. En revanche, l'azote absorbé prend en compte la biomasse, ce qui "compense" cette perte d'activité photosynthétique, et permet d'avoir des azotes absorbés tout de même plus élevé dans les zones à plus fortes biomasses.

- Cartographie de l'azote absorbé (qn) :

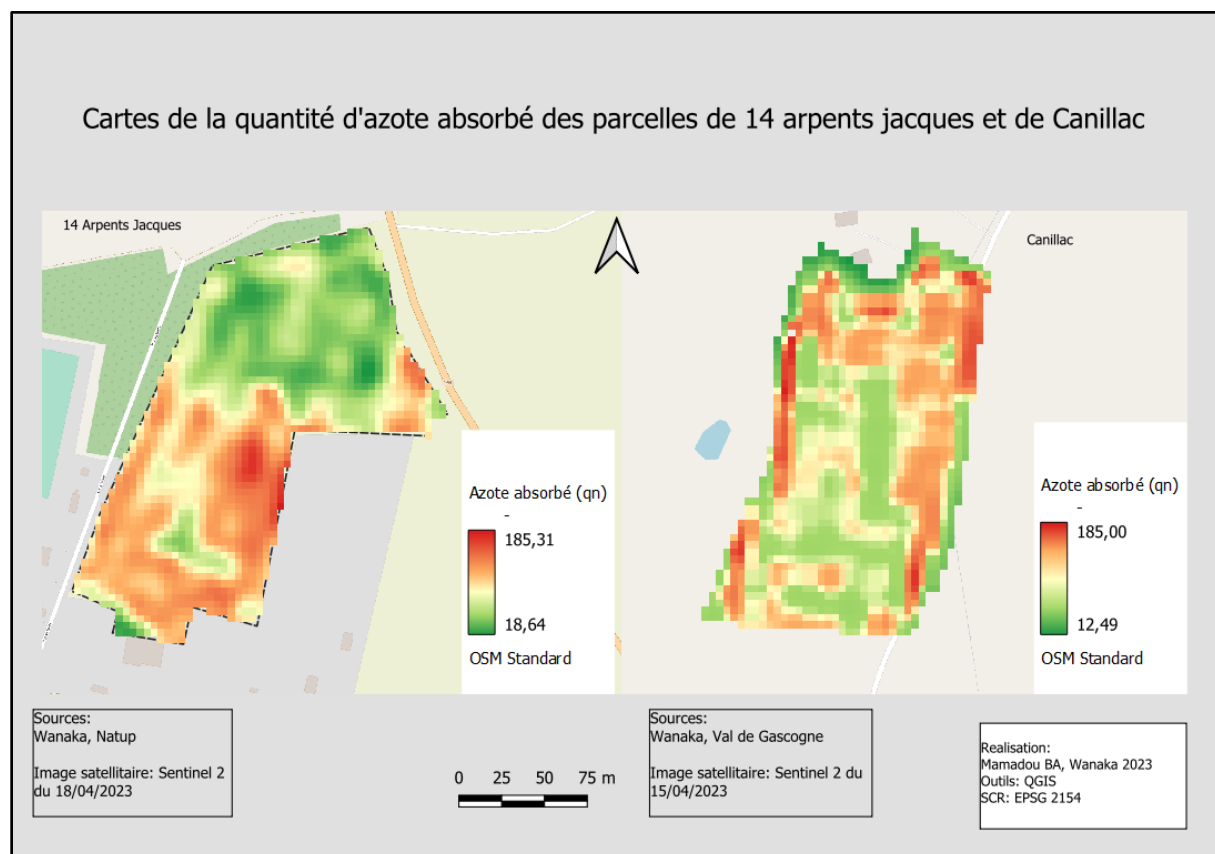


Figure 12 : Cartes de la quantité d'azote absorbé

Ces cartes représentent l'estimation de la quantité d'azote absorbée par la végétation, qui prend en compte à la fois la biomasse des plantes et leur capacité à absorber l'azote.

Ces cartes permettent de visualiser spatialement la distribution de l'azote absorbé par la végétation, en mettant en évidence les zones où les plantes ont une capacité élevée à absorber l'azote et où la biomasse est importante. Les valeurs plus élevées sur la carte indiquent une plus grande quantité d'azote absorbée par les plantes. L'azote absorbé par la végétation est un indicateur clé de la nutrition des plantes et de leur croissance. Une absorption adéquate de l'azote est essentielle pour le développement sain des plantes et peut avoir un impact significatif sur le rendement des cultures.



- Cartographie de l'azote critique :

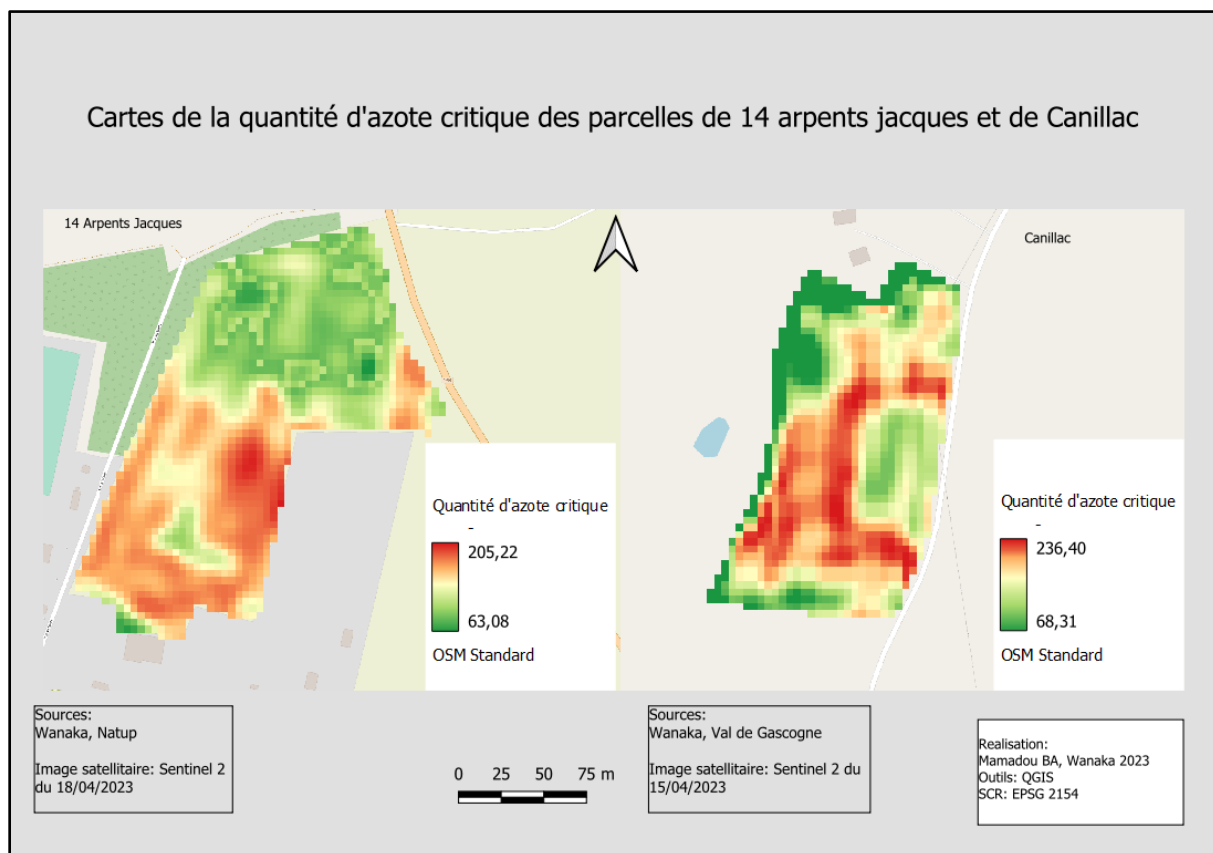


Figure 13 : Cartes de l'azote critique

Ces cartes représentent l'estimation de la quantité d'azote nécessaire pour atteindre un niveau optimal de croissance et de développement des plantes, en se basant sur la biomasse mesurée pendant la période d'épiaison. La carte d'azote critique permet d'identifier spatialement les zones où les plantes ont un besoin accru en azote pour atteindre leur plein potentiel de croissance. Les valeurs plus élevées sur la carte indiquent les zones où l'azote critique est élevé, ce qui signifie que davantage d'azote doit être fourni aux plantes pour optimiser leur rendement et leur santé. En utilisant cette carte, les agriculteurs peuvent déterminer les zones où une fertilisation supplémentaire en azote est nécessaire pour maximiser les rendements agricoles. La carte peut également être utilisée pour évaluer la répartition spatiale de la fertilité des sols et identifier les zones où des pratiques de gestion spécifiques, telles que l'apport ciblé d'engrais azotés, peuvent être mises en œuvre.

- Calcul de l'azote à apporter : Azote Critique – Quantité d'azote absorbé(qn)

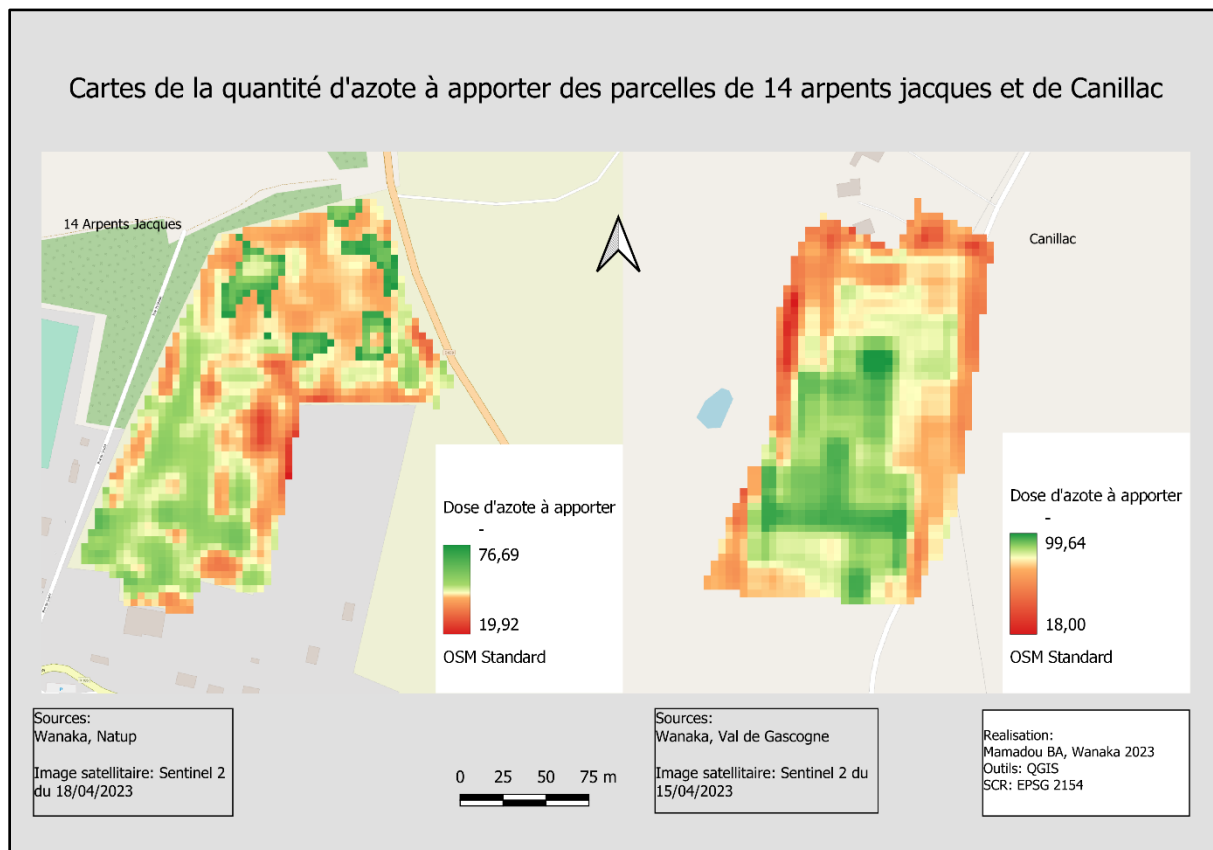


Figure 14 : Cartes de l'azote à apporter

Ces cartes représentent les estimations de la quantité d'azote à fournir aux cultures pour atteindre un niveau optimal de croissance et de rendement. La carte d'azote à apporter fournit des informations essentielles pour optimiser la gestion de la fertilisation des cultures. Elle aide à déterminer les besoins en azote des cultures et à ajuster les apports en conséquence, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et durable des ressources agricoles.

Après avoir calculé l'azote absorbé, on procède à la création des cartes de modulation (figure 13) des parcelles (les supports visuels qui permettent aux clients d'avoir un aperçu de leur parcelle avant d'épandre les doses, ensuite un fichier de modulation de format shapefile ou ISO XML leur sera envoyé pour épandre leurs doses de manière automatique avec leur épandeur). Cette étape vise à ajuster la quantité d'azote en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque zone, notamment le potentiel de sol.

Pour avoir la carte de modulation par pilotage par zone de potentiel de sol, on calcule la moyenne des pixels issus de la carte de la dose à apporter à l'intérieur de chaque zone de potentiel de sol de la parcelle. Cette moyenne constitue la dose d'azote à apporter en unité pour cette zone de potentiel de sol. Donc pour le pilotage, les doses d'azote à apporter viennent directement de la moyenne des pixels de chaque zone de potentiel.

Pour effectuer la carte de modulation de répartition par classe de sol, on calcule d'abord la moyenne des pixels issus de la carte de l'azote à apporter sur l'ensemble de la zone étudiée (la parcelle). Cette moyenne est ensuite utilisée pour calculer la dose à attribuer à la zone de potentiel minimale. On attribue ensuite une dose supérieure de 10 unités pour chaque zone de potentiel supérieur (10 unités de plus sur la deuxième zone, 20 unités de plus sur la troisième, etc.). La dose minimale est donc calculée de sorte que la moyenne finale à la parcelle soit égale à la moyenne initialement calculée. Par exemple, une parcelle de 10 ha de surface contient 3 zones, avec une zone 1 de 1 ha, une zone 2 de 5 ha et une zone 3 de 4 ha. La moyenne d'azote à apporter sur la parcelle est initialement calculée à 50 unités. Ainsi, cette donnée nous permet de déterminer que la dose à apporter à la zone de potentiel minimale est de 37, puis 47 pour la deuxième zone, et 57 pour la troisième zone. Ces trois valeurs respectent la moyenne de 50 unités à la parcelle lorsqu'elles sont pondérées par la surface de leur zone respective :  $(37*1 + 47*5 + 57*4)/10 = 50$  unités.

Détail du calcul :

Pour une parcelle de 3 zones de potentiel de sol:

Dose moyenne =  $(D1*S1 + D2*S2 + D3*S3) / Stot$ , où :

- D1 est la dose minimale (sur la zone de surface S1 de potentiel minimum)
- D2 est la dose médiane (sur la zone de surface S2 de potentiel médian)
- D3 est la dose maximale (sur la zone de surface S3 de potentiel maximal)
- Dose moyenne est la dose moyenne calculée sur la surface totale Stot

D1, D2 et D3 sont espacées de 10U compte tenu du cahier des charges, on a donc :

Dose moyenne =  $(D1*S1 + (D1+10)*S2 + (D1+20)*S3) / \text{Surface totale}$

Dose moyenne \* Surface totale =  $D1(S1+S2+S3) + 10*S2 + 20*S3$

$D1 = (\text{Dose moyenne} * \text{Surface totale} - (10*S2 + 20*S3)) / \text{Surface totale}$

Avec les données de l'exemple :  $D1 = (50 * 10 - (10*5 + 20*4)) / 10 = 37U$

On a donc  $D1 = 37U$ ,  $D2 = 47U$  et  $D3 = 57U$

**NB** : notons que les valeurs de pixels issues de carte de la dose d'azote à apporter sont les unités d'azote à apporter.

Ce processus de modulation par zone garantit une adaptation plus fine des doses d'azote en fonction des variations de potentiel de sol, permettant ainsi une gestion plus précise et efficiente de la fertilisation. Il prend en compte les différences de besoins et de capacité de rétention de l'azote du sol dans chaque zone, contribuant ainsi à une utilisation optimale des ressources et à une réduction des impacts environnementaux liés à la fertilisation excessive.

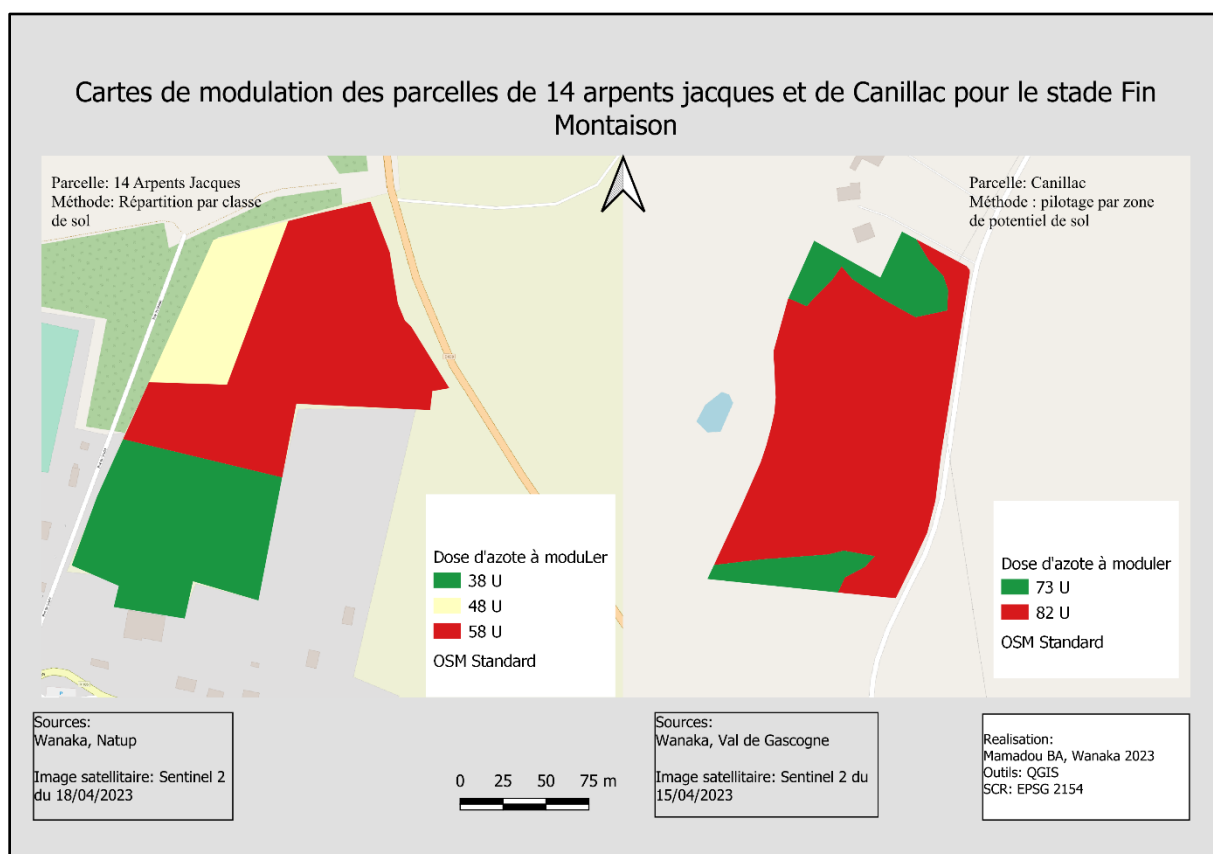


Figure 15 : Cartes de modulation

Ces cartes de modulation présentent une représentation visuelle des différentes zones en fonction de leur potentiel agronomique. Les zones sont classifiées en trois catégories : faible potentiel, potentiel secondaire et fort potentiel. Au stade DFE, les conseils sont faits en

renforcement. C'est à dire que l'accent est mis sur l'apport supplémentaire d'azote dans les zones de fort potentiel, afin de soutenir leur développement et maximiser leur rendement. En revanche, les zones de faible potentiel reçoivent une dose d'azote moins importante, correspondant à leurs besoins réduits.

Une graduation de couleur allant du vert au rouge est utilisée pour représenter les différentes catégories de potentiel de sol et d'azote à apporter. Les zones de faible potentiel sont représentées en vert, indiquant une faible dose d'azote à apporter en raison de leur capacité limitée à assimiler les nutriments. Les zones de potentiel moyen sont représentées en jaune clair, ce qui suggère une dose d'azote modérée adaptée à leur niveau de productivité. Enfin, les zones de fort potentiel sont affichées en rouge, indiquant une dose élevée d'azote à apporter pour soutenir leur fort rendement potentiel. Cette approche de modulation de l'azote en fonction du potentiel de sol permet d'optimiser la fertilisation en adaptant les quantités d'azote en fonction des capacités de chaque zone. Elle vise à maximiser l'efficacité et la rentabilité de la fertilisation, tout en minimisant les risques de gaspillage et de pollution environnementale. En accordant une attention particulière aux zones de fort potentiel, on cherche à exploiter pleinement leur capacité de production, ce qui peut contribuer à une amélioration globale des rendements agricoles.

#### IV-2) Discussion

Étant un élément crucial dans la culture de blé, la fertilisation azotée joue un rôle important dans le rendement et la qualité des récoltes. L'avancée de la technologie de télédétection satellitaire offre de nouvelles opportunités passionnantes en termes de surveillance et d'évaluation des cultures à grande échelle en tenant compte de la variation spatio-temporelle des besoins des plantes. En combinant des données satellitaires et des informations sur le potentiel de sol, il est possible d'établir une méthode de conseil en fertilisation azotée.

L'objectif de cette étude cherche à répondre un besoin particulier différent du modèle classique de fertilisation azotée existante au sein de la structure, donc mettre en place d'un nouveau modèle spécifique de fertilisation azotée. Pour ce faire différentes étapes ont été réalisées et expliquées pouvant arriver à offrir un conseil de fertilisation azotée.

Dans cette section, nous allons discuter des résultats obtenus en fertilisation azotée qui combinent les données satellitaires d'état végétal et le potentiel de sol comparés au modèle existant qui tient compte uniquement des données satellitaires d'état végétatif. Nous abordons aussi des limites du modèle.

L'établissement du modèle intègre les aspects agronomiques et technologiques et les résultats répondent aux besoins des clients. Le conseil en fertilisation azotée combinant les données satellitaires d'état végétatif et le potentiel permet d'avoir de manière plus précise le besoin en azote des cultures. Cela permet d'ajuster la quantité d'engrais azoté appliqué en fonction des conditions spécifiques de chaque zone, en prenant en compte les changements de la plante et la capacité du sol à fournir des éléments nutritifs. Ça permet aussi une optimisation de l'utilisation des ressources, une gestion proactive des problèmes de fertilité du sol, une surveillance continue et des prises de décisions rapides.

Pour mieux appréhender le modèle, nous allons comparer les cartes de modulation issues du modèle classique de Wanaka et celles issues de la répartition par classes de sol et par pilotage de zones de potentiel.

Le nombre de classes pour le modèle classique de Wanaka est compris entre 1 et 6 classes selon le conseil et le client mais ça peut dépendre de l'épandeur de l'agriculteur (généralement on a quatre zones ou moins pour que l'épandeur fonctionne correctement).

Voici une cartographie de la modulation d'azote à apporter.



## Pour la parcelle 14 Arpents Jacques (répartition par classes de sol)

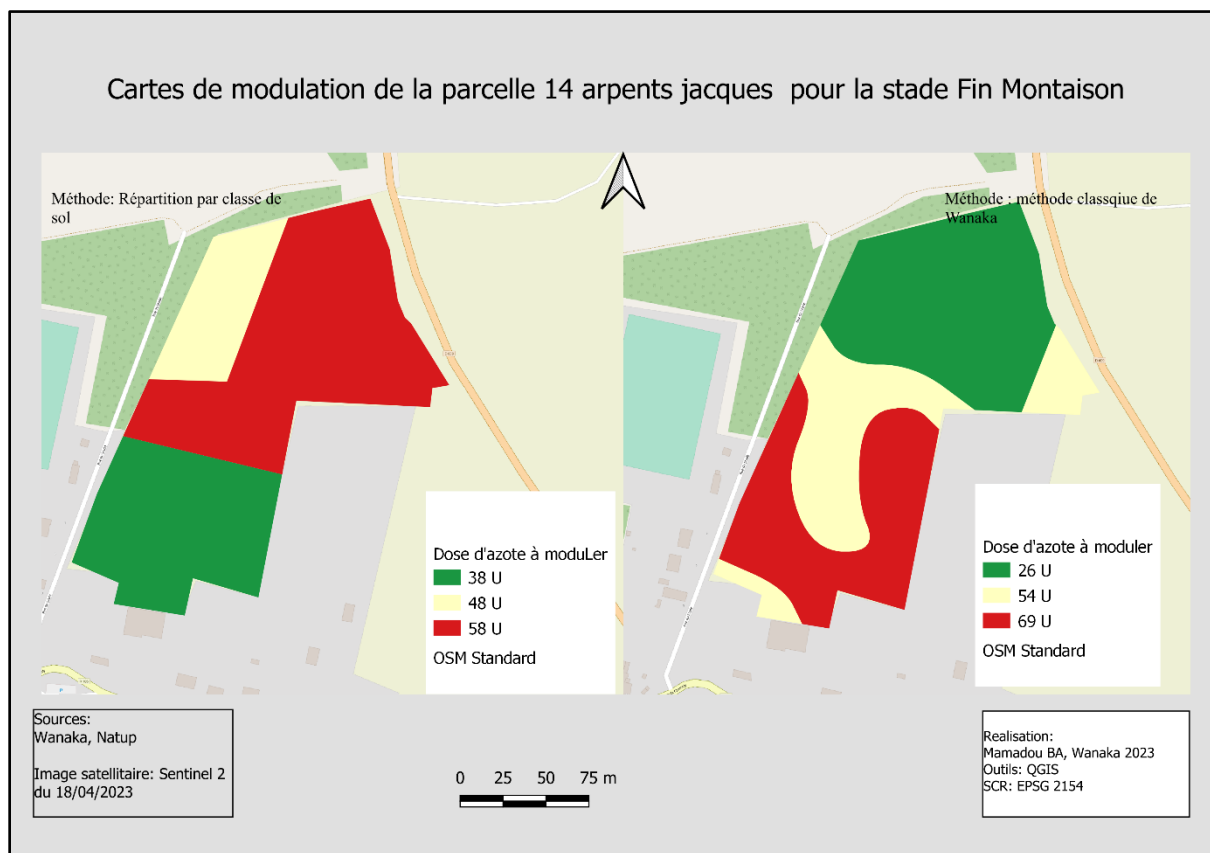


Figure 16 : Cartes de comparaison pour 14 Arpents Jacques

Nous avons deux cartes distinctes dans cet exemple. La première représente la modulation de l'azote à appliquer pour le stade de fin de montaison en utilisant le potentiel de sol combiné avec les données satellitaires d'état végétatif (méthode améliorée), tandis que la deuxième carte représente la modulation de l'azote à appliquer en fonction de l'estimation de la biomasse (répartition par classe de biomasse, méthode classique de Wanaka). Cependant, ces deux conseils ne correspondent pas, ils sont même plutôt opposés.

Pour le stade de fin de montaison, les conseils de fertilisation traditionnels de Wanaka sont basés sur le renforcement, ce qui signifie que les zones avec une biomasse élevée reçoivent une dose plus élevée d'azote que les zones avec une biomasse plus faible. Dans l'exemple présenté, la dégradation de couleur va du vert (faible dose d'azote) au rouge (forte dose d'azote) dans cette parcelle. Cependant, d'un point de vue spatial, nous constatons que la zone qui devrait recevoir la dose la plus élevée selon les conseils traditionnels de Wanaka présente en réalité la

dose la plus faible selon la répartition par classes de sol. En d'autres termes, la zone à fort potentiel de sol reçoit une dose d'azote plus faible, tandis que la zone à faible potentiel de sol reçoit une dose plus élevée.

Cette dissemblance entre la méthode basée sur la biomasse et celle basée sur le potentiel de sol, peut être due à plusieurs facteurs. Les facteurs peuvent être liés aux conditions météorologiques de la prise d'image surtout avec la méthode de Wanaka classique qui tient compte uniquement de la biomasse. Il y'a aussi le manque d'homogénéisation des prises des mesures de potentiel de sol qui se font par échantillonnage. Il est possible également que les données de sol et les données satellites d'état végétatif soient décorrélées, elles rendent compte de paramètres différents de la culture, qui peuvent donc évoluer différemment selon le contexte de la parcelle. Le sol a tendance à avoir une évolution sur le long terme, alors qu'un contexte climatique à court terme peut fortement influencer l'imagerie satellite.

**Pour la parcelle Canillac (Pilotage par zone de potentiel de sol)**

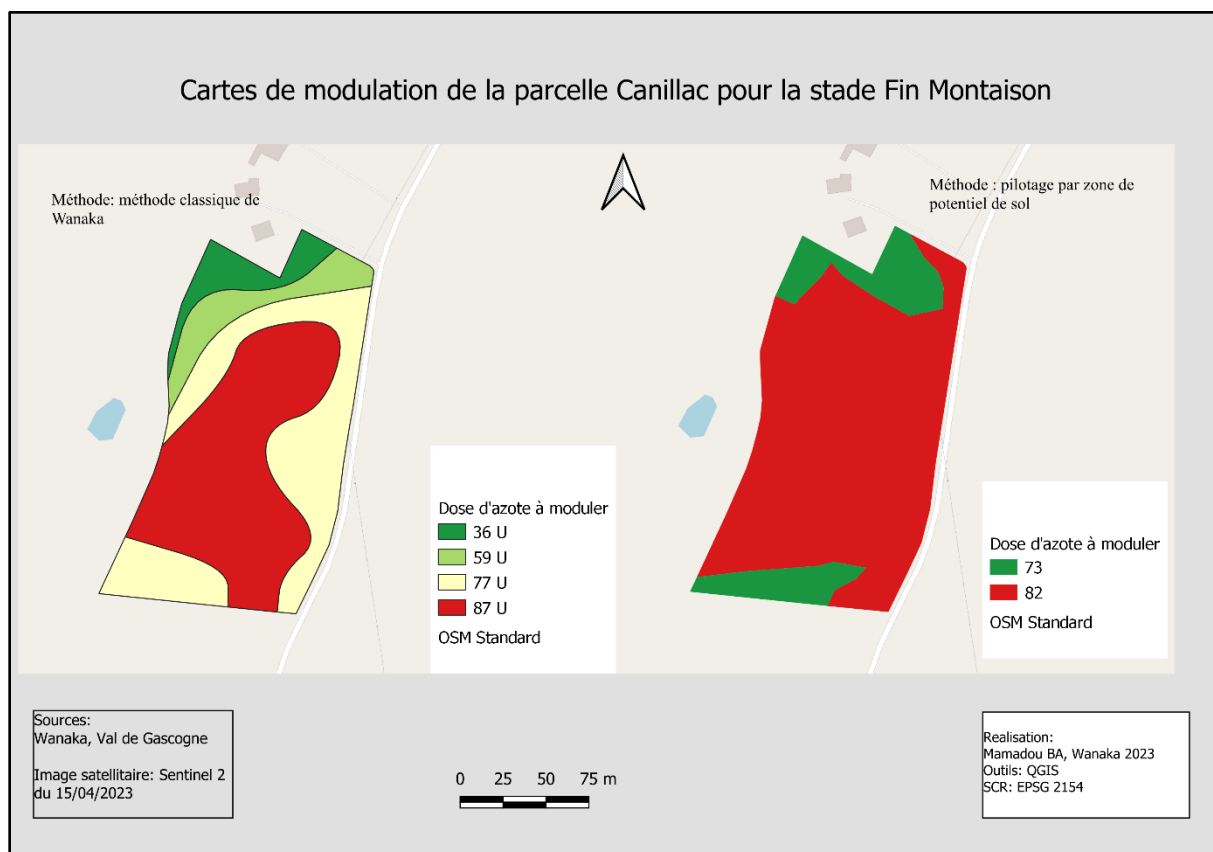


Figure 17 : Cartes de comparaison pour Canillac

Pour cet exemple spécifique, nous disposons également de deux cartes distinctes fournissant des recommandations en matière de modulation de l'azote. La première carte représente les conseils de modulation d'azote selon la méthode classique de Wanaka, qui divise la parcelle en différentes zones en se basant sur la biomasse. La deuxième carte, quant à elle, combine à la fois le potentiel de sol et l'état végétatif de la parcelle pour proposer des recommandations.

Le conseil classique de Wanaka propose une modulation de l'azote en fonction de quatre zones distinctes basées sur la répartition de la biomasse. En revanche, le conseil basé sur le potentiel de sol et l'état végétatif de la parcelle ne propose que deux zones distinctes en se basant sur le potentiel de sol. La méthode classique détaille plus la parcelle en offrant différentes zones possibles pour la préconisation de l'azote tandis que celle basée sur les zones de potentiel de sol suit la logique du nombre de zones de potentiel de sol de la parcelle. Dans ce cas de figure

on voit que la méthode classique est plus précise même si avec dans des situations de plusieurs zones on peut rencontrer des problèmes avec l'épandeur. Mais ce qui est important à noter de ce cas, est que la zone qui a besoin de plus d'azote se trouve pratiquement sur la même zone entre la méthode classique et celle basée sur le potentiel de sol. Si le modèle classique reste une méthode purement scientifique, le modèle basé sur les potentiels de sol renferme plus une valeur commerciale et agronomique. C'est-à-dire le modèle de conseil en fertilisation azotée combinant les données satellites et de potentiel de sol, malgré qu'il reste un modèle scientifique et agronomique, regorge une valeur commerciale pour les distributeurs.

Ce niveau de détail dans les recommandations peut permettre une meilleure adaptation de la modulation de l'azote aux conditions spécifiques de la parcelle, en prenant en compte à la fois la biomasse et le potentiel de sol. Cette approche peut conduire à des pratiques de fertilisation plus précises et optimisées, permettant ainsi d'améliorer l'utilisation des ressources et la productivité agricole.

## Conclusion

En conclusion, on peut dire que l'établissement d'une méthode de conseil en fertilisation azotée combinant les données satellitaires d'état végétatif et des données de potentiel de sol constitue une avancée importante dans le domaine de l'agronomie. Cette approche combine la puissance technologique et la composition du sol et elle permet aux agriculteurs de prendre des décisions beaucoup plus optimales et éclairées. C'est une vision globale et continue en termes de surveillance des cultures, d'optimisation des intrants et d'augmentation des rendements dans le respect et la durabilité de l'environnement.

Cependant, cette approche pleinement convoitée par les structures spécialisées dans les OAD dans l'AP et agricultures, nécessite une amélioration de la précision des mesures sur la zonalité des potentiels de sol qui se fait par échantillonnage ce qui ne traduit pas les mêmes caractéristiques sur l'ensemble de la parcelle. De plus, la recherche continue dans ce domaine est nécessaire pour améliorer la précision des modèles et des recommandations, en intégrant davantage de facteurs environnementaux et climatiques.

En somme, établir et automatiser une méthode de conseil en fertilisation azotée sur le blé en combinant les données satellites d'état végétatif et les données de potentiel de sol représente une opportunité encourageante pour l'AP. En combinant l'innovation technologique avec une approche écologiquement responsable, nous pouvons contribuer à renforcer la sécurité alimentaire, protéger l'environnement et promouvoir une agriculture durable pour les générations futures. Pour une meilleure amélioration de cette méthode, dans l'avenir il serait nécessaire d'analyser des paramètres climatiques et météorologiques pour expliquer les discordances entre le potentiel de sol et les données satellitaires de végétation, le but dans le long terme est de limiter les discordances.

## Références bibliographiques :

- Abis, Sébastien, (2015). *Le blé au cœur des enjeux géostratégiques mondiaux* Dans Hérodote 2015/1 (n° 156), pages 125 à 137
- Cassman, K. G., & Dobermann, A. (2002). *Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia* (Vol. 247). Kluwer Academic Publishers.
- Charvet, Jean-Paul « **BLÉ** », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 18 juillet 2023. URL : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ble/1-les-differents-types-de-ble/>
- Delgado, J. A., & Cabrera, M. L. (1995). *Nitrate-nitrogen recommendations for corn based on soil test information*. Soil Science Society of America Journal, 59(6), 1715-1722.
- Drinkwater, L. E., Wagoner, P., & Sarrantonio, M. (1998). *Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses*. Nature, 396(6708), 262-265.
- Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. Sinauer Associates.
- Galli, A., Giampietro, M., Goldfinger, S., & Lazarus, E. (2016). *Ecological Indicators* 69 224–232 225.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). *Precision agriculture and food security*. Science, 327(5967), 828-831.
- [https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/fertilisation\\_du\\_ble/](https://www.agro.basf.fr/fr/cultures/ble/fertilisation_du_ble/): consulté le 30 juin 2023.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). *Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band*. Remote Sensing of Environment, 112(10), 3833-3845.
- Lal, M., Kumar, A., & Venkatesh, A. (2019). *Use of satellite remote sensing in soil fertility mapping*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 47(3), 457-467.
- Lal, R. (2004). *Soil carbon sequestration to mitigate climate change*. Geoderma, 123(1-2), 1-22.



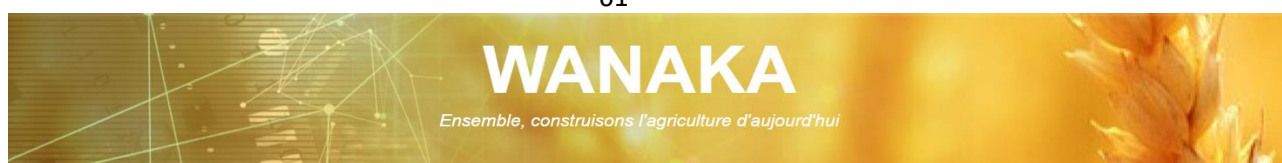
- Lemaire, G., Gastal, F., Plenet, J., & Le Bot, J. (1997). *Le prélèvement d'azote par les peuplements végétaux et la production des cultures*. In Maîtrise de l'azote dans les agro-systèmes (G. Lemaire et B. Nicolardot, éditeurs), Reims (France), 19-20 novembre 1996. Ed. INRA, Paris (France) 1997, Les Colloques (83), 121-139.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers.
- Mulla, D. J. (2013). *Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps*. Biosystems Engineering, 114(4), 358-371.
- Poeplau, C., & Don, A. (2015). *Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 200, 33-41.
- Robert, P. C. (2002). *Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management* (Vol. 247). Kluwer Academic Publishers.
- Rouse Jr., J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In : Third ERTS Symposium, NASA SP-351. NASA, Washington, DC, pp. 309-317.
- Schepers, J. S., & Raun, W. R. (2008). *Nitrogen in agriculture: Nitrogen use efficiency and current and future trends*. In Advances in agronomy (Vol. 98, pp. 1-66). Academic Press.
- Sinaj, S., Charles, R., Baux, A., Dupuis, B., Hilbrunner, J., Levy, L., Pellet, D., Blanchet, G., & Jeangros, B. (2017). *Fertilisation des grandes cultures*, p.45.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., et al. (2002). *Agricultural sustainability and intensive production practices*. Nature, 418(6898), 671-677.
- Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127-150.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. Geoderma, 131(1-2), 59-75.

- White, P. J., & Broadley, M. R. (2012). *Physiological and molecular aspects of nutrition in plants*. Academic Press.
- Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., Li, C., Babu, J. Y., Salas, W., ... & Moore III, B. (2006). *Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images*. Remote Sensing of Environment, 100(1), 95-113.



## Table des matières

Sommaire .....	3
Remerciements .....	4
Sigles et Abréviations .....	5
Résumé .....	6
Abstract .....	6
Introduction .....	7
I-) Présentation de la structure Wanaka .....	9
I-1) Wanaka, une structure qui a su développer des compétences unissant télédétection et agronomie.....	9
I-2) Le blé en tant que culture clé sur le plan économique et alimentaire et justification de la nécessité de la fertilisation. ....	12
I-3) Missions et tâches du stage .....	14
II-) État de l'art des méthodes de conseils en fertilisation azotée du blé .....	17
II-1) Les approches existantes en conseil de fertilisation azotée et leurs limites .....	17
II-2) Présentation de la méthode classique de conseil en fertilisation utilisée par Wanaka .....	26
II-3) Un besoin d'améliorer la méthode classique de Wanaka .....	28
II-4) Importance de la combinaison de l'image satellite et potentiel de sol .....	30
III-) Réalisations techniques : conception et automatisation d'une nouvelle méthode de conseil en fertilisation azotée .....	32
III-1) Présentation des données utilisées .....	32
III-1-1) Données satellitaires d'états végétatifs.....	32
III-1-2) Données de potentiel de sol .....	33
III-2) Méthodologie.....	34
III-2-1) Méthodologie pour la répartition par classes de sol. ....	35
III-2-2) Méthodologie pour pilotage par zone.....	37
III-3) Automatisation.....	39
IV-) Résultats et discussion .....	41
IV-1) Résultats.....	43
IV-1-1) Calcul de l'azote à apporter .....	43
IV-2) Discussion .....	51
Conclusion.....	57
Références bibliographiques : .....	58
Table des matières .....	61
Tables des figures .....	62



Annexes : .....	63
-----------------	----

## Tables des figures

<a href="#"><u>Figure 1 : Domaine d'expertise de Wanaka</u></a> .....	9
<a href="#"><u>Figure 2 : Exemple de blé dur et de blé tendre</u></a> .....	13
<a href="#"><u>Figure 3 : Méthodologie pour calculer la dose d'azote à apporter</u></a> .....	26
<a href="#"><u>Figure 4 : Exemple de conseil Wanaka</u></a> .....	28
<a href="#"><u>Figure 5 : Résumé méthodologie</u></a> .....	34
<a href="#"><u>Figure 6 : Méthodologie par répartition par classe de sol</u></a> .....	36
<a href="#"><u>Figure 7 : Méthodologie par pilotage</u></a> .....	37
<a href="#"><u>Figure 8 : Carte de localisation des parcelles tests</u></a> .....	41
<a href="#"><u>Figure 9 : Carte des zones de potentiel de sol</u></a> .....	42
<a href="#"><u>Figure 10 : Cartes des biomasses</u></a> .....	43
<a href="#"><u>Figure 11 : Cartes de la capacité d'absorption</u></a> .....	44
<a href="#"><u>Figure 12 : Cartes de la quantité d'azote absorbé</u></a> .....	46
<a href="#"><u>Figure 13 : Cartes de l'azote critique</u></a> .....	47
<a href="#"><u>Figure 14 : Cartes de l'azote à apporter</u></a> .....	48
<a href="#"><u>Figure 15 : Cartes de modulation</u></a> .....	50
<a href="#"><u>Figure 16 : Cartes de comparaison pour 14 Arpents Jacques</u></a> .....	53
<a href="#"><u>Figure 17 : Cartes de comparaison pour Canillac</u></a> .....	55
<a href="#"><u>Figure 18 : Tableau de bord de la plateforme Agrorendement</u></a> .....	63
<a href="#"><u>Figure 19 : Tableau de bord de la plateforme Phytoprotech</u></a> .....	63
<a href="#"><u>Figure 20 : script pour calculer la dose d'azote à apporter</u></a> .....	65
<a href="#"><u>Figure 21 : script pour le pilotage par zone de potentiel de sol</u></a> .....	66
<a href="#"><u>Figure 22 : script pour la répartition par classe de sol</u></a> .....	68



## Annexes :

### Annexe 1 :



Figure 18 : Tableau de bord de la plateforme Agrendement

### Annexe 2:



Figure 19 : Tableau de bord de la plateforme Phytoprotech

## Annexe 3:

```
Entrée [ ]: # Importation des bibliothèques nécessaires pour la réalisation du script
import os
import glob
import rasterio
import rasterio as rio
from rasterio.mask import mask
from rasterio import features
import pandas as pd
import geopandas as gpd
import numpy as np
import rasterstats as rs
import logging
import statistics
import vector as v

# Désactiver les avertissements RuntimeWarning pour les opérations mathématiques effectuées avec numpy
np.seterr(over='ignore', invalid='ignore')

# Lire tous les fichiers raster dans un dossier
raster_dir = "D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE"
raster_files = glob.glob(os.path.join(raster_dir, "*.tif"))

# Lire le shapefile pour découper les rasters
shapefile = "D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/Canillac_limite.shp"
gdf = gpd.read_file(shapefile)

# Ajouter un nouveau shapefile
new_shapefile = "D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/Canillac_zones.shp"
Zones_gdf = gpd.read_file(new_shapefile)

# Définir les paramètres d'épaisseur (stade et bq)
stade = "DFE"
bq = 3.2
logger = logging.getLogger(__package__)
def get_epiaison_values(stade, mean_biomass):
    if stade == "DFE":
        if mean_biomass < 3.73:
            return 0, 2.03
        else:
            return 5.19, 0.45

# Parcourir chaque fichier raster
```

```
for file in raster_files:
    # Lire le raster
    with rio.open(file) as src:
        # Couper le raster par le shapefile
        out_image, out_transform = mask(src, gdf.geometry, crop=True)

        # Extraire les bandes du raster
        lai = out_image[0] # Bande 1

        # Calculer la biomasse
        def compute_biomass_satellite(lai):
            value1 = -0.7741
            value2 = 1.3788
            values_lai = lai
            biomass = value2 * values_lai + (value1)
            biomass[biomass < 0] = 0
            return biomass

        biomass = compute_biomass_satellite(lai)
        mean_biomass = np.mean(biomass)
        biomass_list = [mean_biomass]
        # Extraire la bande s2rep seulement si elle existe
        if out_image.shape[0] > 1:
            s2rep = out_image[1] # Bande 2

            # Calculer la quantité d'azote
            def compute_absorbed_azote_amount_satellite(s2rep, biomass):
                value1 = 117.5821
                value2 = -0.1576
                values_s2rep = s2rep
                values_biomass = biomass
                absorbe = value1 + value2 * values_s2rep
                qn = 10 * absorbe * values_biomass
                qn[qn < 0] = 0
                return qn

            qn = compute_absorbed_azote_amount_satellite(s2rep, biomass)

            # Calculer la quantité d'azote à donner
            def compute_critical_azote(raster, value1, value2, epiaison_values, bq):
                values = raster
                critical_azote = np.where(
                    values > 1,
                    value1 * (epiaison_values[0] + values * epiaison_values[1]) ** value2,
```



```

        value1,
    )
    critical_azote = critical_azote * bq / 3
    critical_azote = (
        10 * critical_azote * (epiaison_values[0] + values * epiaison_values[1])
    )
    critical_azote[critical_azote < 0] = 0
    return critical_azote

epiaison_values = get_epiaison_values(stade, mean_biomass)
critical_azote = compute_critical_azote(biomass, 5.35, -0.442, epiaison_values, bq)

#
def compute_azote_prediction(raster1, raster2):
    values1 = raster1
    values2 = raster2
    azote_prediction = values1 - values2
    azote_prediction[azote_prediction < 0] = 0
    return azote_prediction

# Calculer la quantité d'azote à donner
def compute_azote_quantity_to_give(raster1, raster2):
    values1 = raster1
    values2 = raster2
    azote_quantity_to_give = values1 - values2
    azote_quantity_to_give[azote_quantity_to_give < 0] = 0
    return azote_quantity_to_give

# Calculer la quantité d'azote à donner pour le raster en cours de traitement
azote_quantity_to_give = compute_azote_quantity_to_give(critical_azote, qn)
mean_n = np.mean(azote_quantity_to_give)
n_list = [mean_n]

# Créer un nouveau fichier raster pour enregistrer les quantités d'azote à donner
azote_quantity_to_give_file = "D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/azote_quantity_to_give.tif"
with rio.open(file) as src:
    profile = src.profile
    profile.update(
        dtype=rio.float64,
        count=1,
        compress='lzw'
    )
    with rio.open(azote_quantity_to_give_file, 'w', **profile) as dst:

```

```

dst.write(azote_quantity_to_give.astype(rio.float64), 1)

```

Figure 20 : script pour calculer la dose d'azote à apporter

#### - Explication :

Importation des bibliothèques nécessaires, telles que os, glob, rasterio, pandas, geopandas, numpy, rasterstats, logging et statistics.

Désactivation des avertissements RuntimeWarning pour les opérations mathématiques effectuées avec NumPy.

Le script spécifie le répertoire contenant les fichiers raster, utilise la fonction glob. glob () pour récupérer tous les fichiers raster avec l'extension ".tif" dans ce répertoire, et lit le shapefile (limite de la parcelle) ainsi qu'un nouveau shapefile (couche des zones de potentiel de sol).

Les variables stade et bq sont définies avec des valeurs spécifiques.

Le code itère sur chaque fichier raster, ouvre le raster, le découpe par le shapefile, extrait les bandes du raster, calcule la biomasse, la quantité d'azote absorbée, l'azote critique et la quantité d'azote à donner. Enfin, il enregistre la quantité d'azote à donner dans un nouveau fichier raster.

#### Annexe 4:

```
# Le fichier shapefile des zones raster
raster_zones_path = new_shapefile #"D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/Canillac_zones.shp"

# Le fichier raster de la couche azote_quantity_to_give
azote_raster_path = azote_quantity_to_give_file #"D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/azote_quantity_to_give.tif"

# Chemin de sortie pour le fichier des statistiques zonales
output_stats_path = "D:/Stage_Mamadou/Val_de_Gascogne_DFE/stats.shp"

# Lecture du fichier des zones raster
raster_zones = gpd.read_file(raster_zones_path)

# Lecture du raster de la couche azote_quantity_to_give
with rasterio.open(azote_raster_path) as src:
    # Obtention des valeurs des pixels dans les zones
    stats = rasterstats.zonal_stats(
        raster_zones.geometry,
        azote_raster_path,
        affine=src.transform,
        nodata=src.nodata,
        stats="mean"
    )

# Ajout des statistiques zonales à la couche des zones raster
raster_zones["mean_azote_quantity"] = [s["mean"] for s in stats]

# Enregistrement de la couche résultante
raster_zones.to_file(output_stats_path)
```

Figure 21 : script pour le pilotage par zone de potentiel de sol

#### - Explication :

Pour ce script, nous utilisons les mêmes bibliothèques que dans la première partie de la méthodologie.

Le script commence par définir les chemins des fichiers shapefile et raster.

Ensuite, le fichier shapefile représentant les zones raster est lu et ses données sont assignées à une variable.

De même, le fichier raster de la couche "azote\_quantity\_to\_give" est ouvert et assigné à une variable.

Les statistiques zonales sont calculées en utilisant les géométries des zones raster extraites du fichier shapefile, le raster de la couche "azote\_quantity\_to\_give", l'affine transforme du raster pour relier les coordonnées de pixel aux coordonnées spatiales, la valeur nodata du raster pour ignorer les pixels sans données, et le type de statistique à calculer

(moyenne des valeurs des pixels dans chaque zone). Les statistiques zonales calculées sont ajoutées à une colonne spécifique du GeoDataFrame représentant les zones raster.

Enfin, le GeoDataFrame contenant les statistiques zonales est enregistré dans un nouveau fichier shapefile pour faire la carte de modulation.

## Annexe 5:

```
Entrée [26]: import shapefile
from pathlib import Path

# Ouvrir La couche Shapefile existante en mode Lecture et en mode écriture
file_path = Path("D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/Zones_14_arpentés_jacques1.shp")
sf = shapefile.Reader(str(file_path))
w = shapefile.Writer(str(file_path.with_suffix('.nvelle.shp')), shapeType=sf.shapeType)

# Copier Les champs existants dans La nouvelle couche Shapefile
fields = sf.fields[1:]
for field in fields:
    w.field(*field)

# Ajouter Les deux champs nécessaires
w.field("Dosage_n", "F", 10, 5)
w.field("Dosage", "F", 10, 5)

for shaperec in sf.iterShapeRecords():
    w.record(shaperec.record)
    w.shape(shaperec.shape)

# Enregistrer La nouvelle couche Shapefile
w.close()

# Accéder aux enregistrements (records) du Shapefile
records = sf.records()

# Trier Les enregistrements (records) par ordre croissant en fonction de Leur ID de forme
sorted_records = sorted(records, key=lambda x: x[0], reverse=False)

# Créer une Liste des données triées
data_list = []
for shaperec in sf.iterShapeRecords():
    data = []
    for field in fields:
        data.append(shaperec.record[field[0]])
    if len(shaperec.record) > 1:
        data.append(shaperec.record[-2])
        data.append(shaperec.record[-1])
    else:
        data.append([])
        data.append([])
    data_list.append(data)

# trier La Liste par ordre croissant en fonction de L'indice des champs
sorted_data_list = sorted(data_list, key=lambda x: x[0], reverse=False)

# Afficher La Liste triée
print(sorted_data_list)

[[125.0, [], []], [196.0, [], []], [232.0, [], []]]
```

```

def calcul_moyenne(chemin_raster):
    with rasterio.open(chemin_raster) as src:
        raster_array = src.read(1)
        valid_pixels = raster_array[~np.isnan(raster_array)]
        moyenne = np.mean(valid_pixels)
    return moyenne

raster_filename = "D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/azote_quantity_to_give.tif"
moyenne_raster = calcul_moyenne(raster_filename)
#print(moyenne_raster)
mean_n = moyenne_raster

# sorted_data_List = [[125.0, [], []], [196.0, [], []], [232.0, [], []], [262.0, [], []]]
sorted_data_list = [[125.0, [], []], [196.0, [], []], [232.0, [], []]]

# Si c'est pair
if len(sorted_data_list)%2==0:
    median = int((len(sorted_data_list))/2)
    for i in range(median-1, -1, -1):
        #print("i="+str(i))
        sorted_data_list[i][1]=mean_n-5-10*(median-1-i)
        sorted_data_list[i][2]=sorted_data_list[i][1]/0.335
    for j in range(median, len(sorted_data_list)):
        #print("j="+str(j))
        sorted_data_list[j][1]=mean_n-5+10*(j-1)
        sorted_data_list[j][2]=sorted_data_list[j][1]/0.335

# Si c'est impair
else:
    median = int((len(sorted_data_list)+1)/2)
    for i in range(median-1, -1, -1):
        #print("i="+str(i))
        sorted_data_list[i][1]=mean_n-10*(median-1-i)
        sorted_data_list[i][2]=sorted_data_list[i][1]/0.335
    for j in range(median, len(sorted_data_list)):
        #print("j="+str(j))
        sorted_data_list[j][1]=mean_n+10*(j-1)
        sorted_data_list[j][2]=sorted_data_list[j][1]/0.335

# print(mean_azote_raster)
# print(median)
# print(sorted_data_List)

# Chemin de fichier de sauvegarde
filename = 'D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/sorted_data_list.csv'

# En-têtes de colonnes pour le fichier CSV
header = ['Super28AV', 'Dosage_n', 'Dosage']

# Écriture des données de la liste dans le fichier CSV
with open(filename, mode='w', newline='') as file:
    writer = csv.writer(file)
    writer.writerow(header)
    for row in sorted_data_list:
        writer.writerow(row)

# Charger la liste
df = pd.read_csv('D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/sorted_data_list.csv')

# Charger le Shapefile
gdf = gpd.read_file('D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/Zones_14_arpentés_jacques1.nouvelle.shp')

# Effectuer la jointure
merged = gdf.merge(df, on='Super28AV')

# Enregistrer le résultat dans un nouveau Shapefile
merged.to_file('D:/Stage_Mamadou/Natup_DFE/merged.shp')

```

Figure 22 : script pour la répartition par classe de sol

#### - Explication :

Le code effectue plusieurs opérations pour manipuler les données géospatiales dans un fichier Shapefile. Tout d'abord, il ouvre un fichier Shapefile existant, puis crée un nouveau fichier Shapefile en mode écriture. Cette étape est importante car elle permet de conserver les mêmes bibliothèques pour la manipulation des données.

Ensuite, les champs existants du fichier Shapefile d'origine sont copiés dans le nouveau fichier. Cela garantit que toutes les informations essentielles sont préservées. De plus, deux nouveaux champs sont ajoutés au nouveau fichier.

Une fois les champs copiés et les nouveaux champs ajoutés, les enregistrements et les formes du fichier Shapefile d'origine sont copiés dans le nouveau fichier. Cela garantit que toutes les données sont transférées avec précision.

Après avoir copié les données, le nouveau fichier Shapefile est enregistré, ce qui finalise le processus d'écriture du fichier. Il est maintenant prêt à être utilisé pour les traitements.

Ensuite, le code accède aux enregistrements du fichier Shapefile et les trie par ordre croissant en fonction de leur ID de forme. Cela permet d'organiser les données de manière plus cohérente et facilite le traitement.

Ensuite, une liste de données triées est créée en fonction de la parité de sa longueur. Des calculs spécifiques sont effectués sur les éléments de la liste en fonction d'une valeur moyenne préalablement calculée à partir d'un fichier raster.

La liste de données triées est ensuite sauvegardée dans un fichier CSV.

Ensuite, le fichier CSV est chargé dans un DataFrame pour une manipulation et une analyse plus faciles des données. De plus, le fichier Shapefile est chargé dans un GeoDataFrame, ce qui permet de conserver les informations géospatiales et de bénéficier des fonctionnalités avancées de la bibliothèque.

Enfin, une jointure est effectuée entre le GeoDataFrame et le DataFrame pour combiner les données géospatiales avec les données issues du CSV. Le résultat est ensuite enregistré dans un nouveau fichier Shapefile, qui contient maintenant toutes les données combinées et prêtes à être utilisées pour la carte de modulation.