



HAL
open science

Téledétection et modélisation spatiale des éléments paysagers linéaires méditerranéens

Aymen Ben Ahmed, Insaf Mekki, Jean-Stéphane Bailly, Davide Rizzo

► **To cite this version:**

Aymen Ben Ahmed, Insaf Mekki, Jean-Stéphane Bailly, Davide Rizzo. Téledétection et modélisation spatiale des éléments paysagers linéaires méditerranéens. *Agronomie*. 2023. hal-04534683

HAL Id: hal-04534683

<https://hal.inrae.fr/hal-04534683>

Submitted on 5 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES
RESSOURCES HYDRAULIQUES ET DE LA PÊCHE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE DE TUNISIE

MASTÈRE DE RECHERCHE EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Spécialité Géomatique Appliquée à l'Agriculture et à l'Environnement

Téledétection et modélisation spatiale des éléments paysagers linéaires méditerranéens

Soutenu publiquement par

Aymen BEN AHMED

20 décembre 2023 à INAT

Devant le jury composé de

Mme Zohra LILI CHABAANE, Professeure, INAT

Mme Insaf MEKKI, Maître de conférences, INRGREF

M. Davide RIZZO, Chercheur UMR LISAH

Mme Zeineb KASSOUK, Maître assistant, INAT

M. Jean-Stéphane BAILLY, Chercheur, UMR LISAH

Président

Co-directeur de Mémoire

Co-directeur de Mémoire

Examineur

Membre invité



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents pour leur soutien moral et tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.

A ma sœur Ahlem et mon frère Ilyess qui n'ont cessé de me combler par leur amour et leur tendresse, je leur souhaite tout le bonheur de la vie.

A ma grand-mère Aicha que ce travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que Dieu vous préserve la santé et la longue vie.

A la mémoire de mes grands-pères, la mémoire de ma grand-mère paternelle Qui ont été toujours dans mon esprit et dans mon cœur, je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.

A toute la famille BEN AHMED et EL BOUZIDI sans aucune exception.

A mes amis qui ont été toujours là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements incessants m'ont été d'une immense aide.

Et à tous ceux qui ma réussite leur tient à cœur.

Remerciements

Ma gratitude s'adresse à Madame **Insaf MEKKI** maître de conférences à l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts qui a bien voulu codiriger ce travail, pour ses conseils et ses compétences scientifiques et pour son aide dans l'accomplissement de ce travail de recherche.

Ma gratitude s'adresse à Monsieur **Davide RIZZO** chercheur à l'UMR LISAH qui a bien voulu codiriger ce travail, pour ses conseils et ses compétences scientifiques et pour son aide dans l'accomplissement de ce travail de recherche.

Je dédie un vif remerciement à Monsieur **Jean-Stéphane BAILLY** chercheur à l'UMR LISAH pour ses conseils pertinents durant les séances d'encadrement.

Je tiens à remercier sincèrement Madame **Zohra LILI CHABAANE** professeur à l'Institut National Agronomique de Tunisie pour sa gentillesse de bien vouloir présider le jury et assister à l'évaluation de ce travail.

Mes gratitudes s'adressent aussi à Madame **Zeineb KASSOUK** maître de conférences à l'Institut National Agronomique de Tunisie pour sa gentillesse de bien vouloir assister en tant qu'examinatrice à l'évaluation de ce travail.

Je tiens à remercier vivement les équipes de l'**Institut de Recherche pour le Développement** et l'**Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts** de m'avoir accueilli et pour leur collaboration à ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce mémoire.

Avant-propos

Cette étude a pour **objectif d'évaluer l'impact des éléments linéaires du paysage agricole sur les décisions des agriculteurs en matière de localisation spatiale des cultures en contexte sud-méditerranéen pluvial**. Nous avons examiné ce problème en tant qu'une étude de cas dans un bassin versant agricole situé dans la péninsule du Cap Bon, dans le nord-est de la Tunisie. Cette région présente une diversité d'occupations des sols agricoles et un niveau de fragmentation représentatif des paysages agricoles méditerranéens en système de culture pluviale. De plus, elle a déjà été étudiée dans le cadre du Laboratoire Mixte International (LMI) NAÏLA (<https://lmi-naila.com/>) et du projet ALTOS (PRIMA 2020-2023 <https://altos-project.org>).

Ce travail a reçu le soutien de l'**IRD**, de l'**ANR** (subvention n. ANR-22-CPJ1-0050-01) et du **Programme d'Excellence I-SITE (P.E.I) de l'Université de Montpellier** en tant que contribution à la Chaire de Professeur Junior en Géo-Agronomie.

Les images satellitaires utilisées dans ce travail sont reçu dans le cadre de la Délégation de Service Public relative à l'exploitation des satellites Pléiades conclue entre le CNES et la société AIRBUS DS, AIRBUS DS s'est engagée à assurer un service public de fourniture de produits et services Pléiades au bénéfice d'utilisateurs institutionnels autorisés pour remplir leur responsabilité dans le cadre de leur mission institutionnelle pour des services non marchands **Pléiades © CNES ____ (2022), Distribution AIRBUS DS et Pléiades © CNES ____ (2023), Distribution AIRBUS DS.**

الخلاصة

يعد فهم التكوينات المكانية لأنظمة المحاصيل الزراعية أمرًا ضروريًا لفهم كيفية تنظيمها وتوقع كيفية تطورها المحتمل. تركز هذه الدراسة على توصيف العناصر الخطية مثل المسارات، وحدود قطع الأراضي الزراعية، والتحوطات، والشبكة الهيدرولوجرافية في المناظر الطبيعية الزراعية في البحر الأبيض المتوسط في سياق المحاصيل البعلية المختلطة والثروة الحيوانية. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم تأثير هذه العناصر على التنظيم المكاني لدورة المحاصيل. وعلى أساس الأدبيات الموجودة، تم تطوير معايير وصفية وتصنيفية بالتزامن مع المؤشرات البصرية. ومن أجل التحقق من صحة هذا التصنيف واستكمال البيانات الموجودة، تم إجراء مسح ميداني في منطقة مستجمع مياه لبنة في تونس. أجرت الدراسة تحليلات إحصائية مكانية، بما في ذلك مؤشر الكثافة، والميزات الخطية للمناظر الطبيعية النموذجية للتحقيق في دورها كحواجز أو تقاطعات في تحديد مجاميع حقول نظام المحاصيل. استكشفت الدراسة أيضًا لاستخراج هذه الميزات من صور ذات دقة مكانية عالية جدًا. وجدت (LSD) إمكانات طريقة اكتشاف الجزء الخطي الدراسة أن المعالم الخطية التي لوحظت في لبنة هي في المقام الأول حدود قطعية، معمرة وقابلة للعبور، مع كثافة أعلى في المناطق العنقودية (103 معالم/كم²) مقارنة بالمناطق غير العنقودية (56 معالم/كم²). سلطت النمذجة المفاهيمية لهذه LSD العناصر الضوء على دورها في المكونات المكانية وغير المكانية للمتجمعات المياه. ومع ذلك، أظهرت طريقة قيودًا في استخلاص هذه الميزات بدقة، حيث اكتشفت شرائح مجزأة وولدت العديد من النتائج الإيجابية الخاطئة. في الختام، في حين أن هذه السمات الخطية تؤثر على تخصيص المحاصيل، إلا أن تأثيرها يبدو ضئيلاً مقارنة بالعوامل الأخرى. ومع ذلك، سيكون من المناسب دراسة الديناميكيات المكانية والزمانية لهذه العناصر والتحقق من قوة أساليب التعلم الآلي لاستخراجها ووصفها الموضوعي.

الكلمات المفتاحية: العناصر الخطية، التحليل المكاني، الاستشعار عن بعد، النمذجة، كشف القطع الخطية، هندسة المناظر الزراعية الطبيعية.

Résumé

La compréhension des configurations spatiales des systèmes de culture est essentielle pour saisir leur organisation et anticiper leurs évolutions. Cette étude se focalise sur la caractérisation des éléments linéaires (chemins, limites parcellaires, haies, réseau hydrographique, etc.) dans un paysage agricole méditerranéen en contexte de polyculture-élevage pluvial. Son objectif principal est d'évaluer l'impact de ces éléments sur l'organisation spatiale des assolements. En s'appuyant sur la littérature existante, des critères de description et de classification liés à des indicateurs visuels ont été établis. Une campagne de relevés terrain a été menée dans le bassin versant du Lebna, en Tunisie, afin de valider cette classification et de compléter les données existantes. Les analyses statistiques spatiales, telles que l'indice de densité, ainsi que la modélisation des éléments linéaires paysagers, ont permis d'explorer leur rôle en tant que barrières ou jonctions dans la définition d'agrégats de champs de systèmes de cultures, tout en explorant le potentiel de la méthode de détection de segments de ligne (LSD) pour extraire ces éléments à partir d'images à très haute résolution spatiale. Les résultats de cette étude ont révélé que les éléments linéaires observés au Lebna sont principalement des limites de parcelles, pérennes et franchissables, avec une densité plus élevée dans les zones de clusters (103 éléments/km²) par rapport aux zones hors cluster (56 éléments/km²). La modélisation conceptuelle de ces éléments a permis de mettre en lumière leur rôle dans les composantes spatiales et non spatiales du bassin versant. Cependant, la méthode LSD a montré des limites dans son aptitude à extraire précisément ces éléments, détectant des segments fragmentés et générant plusieurs faux positifs. En conclusion, bien que ces éléments linéaires influent sur l'allocation des cultures, leur impact semble être négligeable par rapport à d'autres facteurs. Cependant, il serait pertinent d'étudier la dynamique spatio-temporelle de ces éléments et de vérifier la robustesse des méthodes d'apprentissage automatique pour leur extraction et leur description thématique.

Mots-clés : éléments linéaires, analyse spatiale, télédétection, modélisation, détection de segment de ligne, agronomie du paysage.

Abstract

Characterising the spatial configurations of cropping systems is essential to understand how they are organised and to anticipate how they are likely to evolve. This study focuses on characterising linear elements such as paths, field boundaries, hedges, and the hydrographic network in a Mediterranean agricultural landscape in a rain-fed mixed crop-livestock context. This study aims to assess the impact of these elements on the spatial organisation of crop rotations. Based on the existing literature, we developed descriptive and classification criteria in conjunction with visual indices. A field survey in the Lebna catchment area in Tunisia allowed us to complement the existing data and to validate this classification. Data were analyzed with spatial statistical methods, including a density index, and then modelled at the landscape level to investigate the role of linear features as barriers or junctions in defining cropland clusters. The study also explored the potential of the Line Segment Detection (LSD) method for extracting these features from very high spatial resolution images. The study found that the linear features observed in the Lebna area are primarily field boundaries, perennial and crossable, with a higher density in cluster areas (103 features/km²) compared to non-cluster areas (56 features/km²). Conceptual modelling of these elements highlighted their role in the spatial and non-spatial components of the catchment landscape. Concerning the LSD method, the parameterisation demonstrated limitations in accurately extracting these features, as it detected fragmented segments and generated several false positives. In conclusion, while these linear features do influence crop allocation, their impact appears to be negligible compared to other factors. In perspective, it would be relevant to study the spatio-temporal dynamics of these elements and verify the robustness of machine learning methods for their extraction and thematic description.

Keywords: linear features, spatial analysis, remote sensing, modelling, line segment detection, landscape agronomy.

Liste des abréviations

AA : Un agrégat de champs de cultures destinées pour l'alimentation animale

BL : Un agrégat de champs de culture de blé

BL-CLM : Un agrégat de champs de blé, de condiments, de légumineuses et d'autres cultures diverses.

BL-CLM-AA : Un agrégat de champs d'un mélange entre le blé, les condiments, les légumineuses, d'autres cultures diverses et les cultures destinées pour l'alimentation animale.

CLM : Un agrégat de champs de condiments, de légumineuses et d'autres cultures diverses.

LSD : Détection de segments de ligne.

Liste des figures

FIGURE 1 : REGLES DE CLASSIFICATION DES SEQUENCES DE CULTURES EN TYPES DE SEQUENCES DE CULTURES. LA REGLE "AU MOINS DEUX ANNEES SUR TROIS AVEC UNE CULTURE DONNEE" DEFINIT LA PRESENCE MAJORITAIRE DE CETTE CULTURE DANS LA SEQUENCE OBSERVEE (BIARNES ET AL., 2021).....	11
FIGURE 2 : CARTE DES AGREGATS DE CHAMPS POTENTIELS PREDITS SELON LE MODELE DEVELOPPE PAR BIARNES ET MEKKI (2018).....	12
FIGURE 3: CARTE DE LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DU LEBNA AU CAP BON EN TUNISIE SUR UN FOND GOOGLE EARTH ENGINE EN AVRIL 2023 DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.	19
FIGURE 4 : REPARTITION DES CLASSES D'UTILISATION DES SOLS DANS LA ZONE D'ETUDE. LES CLASSES D'UTILISATION DES SOLS ONT ETE CLASSIFIEES MANUELLEMENT ET NUMERISEES A UNE RESOLUTION SPATIALE FINE A PARTIR D'UNE IMAGE SPOT DATEE DU 21/03/2016 ET D'UNE IMAGE GOOGLE EARTH DATEE DU 24/05/2016. LA CARTE INCLUT LES CARACTERISTIQUES AYANT DES DIMENSIONS SUPERIEURES A 10-15 METRES. LES ROUTES SECONDAIRES ETROITES, LES SENTIERS, ET LES ETROITES BANDES DE VEGETATION NATURELLE NE SONT PAS PRISES EN COMPTE (MEKKI ET AL., 2018).	21
FIGURE 5 : CALENDRIER DES PRINCIPALES ACTIVITES AGRICOLES POUR LES CULTURES PREDOMINANTES AU LEBNA (BIARNES ET AL., 2021).....	22
FIGURE 6: CARTE DES DONNEES DISPONIBLES SUR LES ELEMENTS LINEAIRES DU BASSIN VERSANT DE LA LEBNA ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG :32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	24
FIGURE 7 : CRITERES DE SELECTION DES ZONES D'ECHANTILLONNAGE POUR L'ETUDE DES ELEMENTS PAYSAGERS AGRICOLES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA LEBNA (BL : BLE, AA : ALIMENTATION ANIMALE ET CLM : CONDIMENT, LEGUMINEUSES, ET AUTRES CULTURES DIVERSES).	26
FIGURE 8 : CARTE DE LA DISTRIBUTION DES ZONES DE L'ECHANTILLONNAGE SUR UNE IMAGE PLEIADES DU 02/02/2022 ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	27
FIGURE 9 : LE SCHEMA CONCEPTUEL DES DONNEES DES ELEMENTS LINEAIRES DU BASSIN VERSANT DE LA LEBNA	32
FIGURE 9 : LES BANDES SPECTRALES DES IMAGES PLEIADES (DINAMIS, 2022).	34

FIGURE 11 : CARACTERISTIQUES LOCALES D'UNE IMAGE TEST : (A) IMAGE TEST (B) IMAGE AVEC SEGMENTS DE LIGNE LSD (LIN ET AL., 2023)	35
FIGURE 12 : ILLUSTRATIONS VISUELLES DE L'ALGORITHME LSD : (A) REGION D'INTERET DE L'IMAGE ; (B) LIGNES DE NIVEAU (PETITES LIGNES NOIRES) ET RECTANGLES APPROXIMATIFS POUR LES ROS DE LIGNE, (C) LES SEGMENTS DE LIGNE SONT DETECTES A PARTIR DE CES RECTANGLES APPROXIMATIFS (GIOI ET AL., 2012).....	37
FIGURE 13 : CARTE DE LA TYPOLOGIE ET LA DISTRIBUTION DES ELEMENTS LINEAIRES DANS LES ZONES DE L'ÉCHANTILLONNAGE ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	39
FIGURE 14 : DIAGRAMME DE LA TYPOLOGIE DES ELEMENTS LINAIRES PRELEVE SUR LE TERRAIN DANS LE LEBNA SELON LES CRITERES DE DESCRIPTION THEMATIQUE.....	42
FIGURE 15 : CARTE DE LA DISTRIBUTION DE LA DENSITE D'ELEMENTS LINEAIRES PAR UNITE DE SURFACE DANS LES ZONES DE L'ÉCHANTILLONNAGE AU LEBNA : EXEMPLE LA ZONE 3, 4 ET 5. CARTE ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	45
FIGURE 16 : COURBE D'ÉVOLUTION L'INDICE DE DENSITE D'ELEMENTS LINEAIRES PAR UNITE DE SURFACE SELON LE NOMBRE D'UNITE GLOBALE.....	46
FIGURE 17 : CARTE DE LA REPARTITION DES NŒUDS DE CONNEXION DES ELEMENTS LINAIRES DANS LES ZONES DE L'ÉCHANTILLONNAGE : EXEMPLE LA ZONE 3, 4 ET 5, ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.	47
FIGURE 18 : CARTE DE LA REPARTITION DE LA DENSITE DES NŒUDS PAR UNITE DE SURFACE : EXEMPLE ZONES 3, 4 ET 5. CARTE ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	49
FIGURE 19 : CARTES D'ELEMENTS LINEAIRES AU BORD DES LIMITES DES CLUSTERS EXEMPLE DE LA ZONE 3 ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.....	50
FIGURE 20 : DIAGRAMME DE LA TYPOLOGIE DES ELEMENTS LINEAIRES DE CONTOUR DES CLUSTERS AU LEBNA.....	51
FIGURE 21 : EXEMPLE D'ELEMENTS LINEAIRES EN JAUNE, CLASSES COMME UN ELEMENT DE CONTOUR DE CLUSTER, MAIS C'EST UN ARTEFACT.	52
FIGURE 22 : CARTE DES SEGMENTS DE LIGNES EXTRAIT PAR L'ALGORITHME LSD DE LA ZONE 6, SUR UNE IMAGE PLEIADES MONOCHROMATIQUE ACQUISE LE 16 JUILLET 2023, ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N.	53

FIGURE 23 : CARTE DES SEGMENTS DE LIGNES EXTRAITS PAR L'ALGORITHME LSD DANS LA ZONE 6, SUR UNE IMAGE PLEIADES MONOCHROMATIQUE ACQUISE LE 16 JUILLET 2023, ELABOREE DANS LE SYSTEME DE PROJECTION EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM ZONE 32N. 54

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : REPARTITION DES CLASSES D'UTILISATION DES SOLS DANS LA ZONE D'ETUDE. LES POURCENTAGES SONT RELATIFS A LA SUPERFICIE TOTALE DE LA ZONE D'ETUDE (BIARNES ET AL., 2021).....	20
TABLEAU 2 : DONNEES GEOLOCALISEES DISPONIBLES, LEUR DATE DE CREATION OU COLLECTE ET LEUR SOURCES RESPECTIVES.	23
TABLEAU 3 : ANALYSE STATISTIQUE DES DIMENSIONS DES ELEMENTS LINEAIRES DANS LES ZONES DE L'ECHANTILLONNAGES.....	40
TABLEAU 4 : DISTRIBUTION DES LONGUEURS PAR TYPE DE TRONÇON D'ELEMENTS LINEAIRES.	43
TABLEAU 5 : ANALYSE SPATIALE DES DENSITES LINEAIRES.	45
TABLEAU 6 : DENSITE DES NŒUDS PAR ZONE D'ANALYSE ET REPARTITION EN CLUSTERS	47
TABLEAU 7 : REPARTITION DE L'INDICE DE DENSITE DE NŒUDS PAR UNITE D DE SURFACE DANS LES ZONES DE L'ECHANTILLONNAGE.....	48
TABLEAU 8 : CRITERES D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'ALGORITHME LSD.	53

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
I. IMPACT DE LA DIVERSITE DES MODES D'UTILISATION DES SOLS ET DE LA FRAGMENTATION SUR LA GESTION DES CULTURES	3
1. Diversité des modes d'utilisation des sols et agriculture durable	3
2. Modèles d'utilisation des sols agricoles	4
3. Organisation spatiale agricole et allocation des cultures aux champs	6
3.1. La séquence collective des cultures	6
3.2. Évolution des systèmes agricoles collectifs : une perspective européenne et méditerranéenne	6
3.3. Gestion des séquences de cultures dans certaines régions d'Afrique du Nord	7
3.4. Règles d'allocation des cultures au niveau de l'exploitation agricole.....	7
3.5. Impact de la fragmentation des champs agricoles sur la gestion des cultures	8
3.6. Exemple d'un schéma d'utilisation des parcelles dans des paysages semi-arides fragmentés ..	9
3.7. Définition d'un agrégat de champs	12
II. CONFIGURATION ET FONCTIONS DES ELEMENTS LINEAIRES DANS LES PAYSAGES AGRICOLES	13
1. Éléments linéaires : définition.....	13
2. Éléments linéaires dans les paysages agricoles.....	14
3. Rôle des éléments linéaires dans les paysages agricoles.....	14
4. Variabilité spatiale des éléments linéaires dans les territoires agricoles.....	15
III. APPORT DE LA TELEDETECTION DANS L'EXTRACTION DES ELEMENTS LINEAIRES	16
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	18
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	18
1. Description géographique et morphologique du bassin versant du Lebna.....	18
2. Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude.....	19
3. Classes d'utilisation des champs dans la zone d'étude	19
4. Caractéristiques des pratiques agricoles dans le bassin versant du Lebna.....	22
II. SELECTION DES DONNEES	23
1. Inventaires des données existantes	23
2. Choix des zones d'échantillonnage	24
3. Distribution spatiale des zones échantillonnées	27

III. METHODE DE COLLECTE DES DONNEES TERRAIN.....	27
IV. DESCRIPTEURS DES ELEMENTS LINEAIRES	28
1. Le Type	28
2. La visibilité.....	29
3. La nature.....	29
4. La pérennité.....	29
5. L'accessibilité.....	29
6. La connexion	30
7. Le degré de connexion	30
V. LE MODELE CONCEPTUELLE DES ELEMENTS LINEAIRES	30
1. Définitions et objectif.....	30
2. Model conceptuel des données du bassin versant de Lebna	31
VI. ÉCHELLE DE NUMERISATION	33
VII. LES INDICES CALCULES	33
VIII. DONNEES SATELLITAIRES.....	33
1. Les images Pléiades	33
2. Les étapes de prétraitement des images satellitaires	34
IX. METHODE DE TELEDETECTION DES ELEMENTS LINEAIRES	35
1. Aperçu générale.....	35
2. La méthode de la détection des segments de ligne (LSD)	37
3. Critères d'évaluation.....	37
4. Logiciels utilisés pour appliquer la méthode LSD.....	38
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	39
I. ANALYSE DE LA DIVERSITE DES TYPES D'ELEMENTS LINEAIRES DANS DIFFERENTES ZONES D'ECHANTILLONNAGE SUR LE TERRAIN.....	39
1. Analyse quantitative de la distribution des éléments linéaires à Lebna par descripteur	41
II. ANALYSE DE LONGUEUR PAR TYPE DE TRONÇON D'ELEMENTS LINEAIRES	43
III. INDICES D'ANALYSE SPATIALE DES ELEMENTS LINEAIRES	44
1.1. Analyse de densité des éléments linaires par zone géographique.....	44
2. Analyse de densité par unité de surface	45
3. Analyse des densités de nœuds par zone géographique.....	46
4. Analyse de densité des nœuds par unité de surface	48
IV. ANALYSE DES ELEMENTS DANS LE CONTOUR DES CLUSTERS.....	50

V. EXTRACTION DES LINEAIRES PAR LA METHODE DETECTION DU SEGMENT DE LIGNE	52
VI. DISCUSSION.....	54
CONCLUSION.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	61
ANNEXES.....	67

Introduction

Les pratiques agricoles et les performances des cultures sont intrinsèquement liées aux contextes environnementaux, sociaux et techniques qui les influencent. Les pratiques agricoles se caractérisent par une remarquable variabilité, à la fois spatiale et temporelle. Les pratiques sont réalisées par les agriculteurs suivant des décisions stratégiques, telles que la rotation des cultures et l'assolement, le choix entre systèmes de culture pluviaux ou irrigués, ainsi que des décisions tactiques. Ces choix dépendent fortement de l'environnement biophysique, notamment des conditions du sol, des conditions météorologiques ou des types de cultures, ainsi que du contexte socio-économique, qui inclut les cotations du marché ou les réglementations en vigueur. De plus, des pratiques de gestion complexes, comme l'irrigation ou la fertilisation, impliquent une série d'opérations techniques à des moments spécifiques. La notion de système de culture regroupe à la fois les choix des cultures et l'ensemble de pratiques pour leur gestion (Rizzo *et al.*, 2019).

Décrire l'organisation spatiale des systèmes de culture sur un étendu régional demeure un défi de taille pour la recherche scientifique, comme en témoignent diverses études. Une telle description exige la prise en compte de deux éléments fondamentaux : d'une part, les facteurs de localisation, c'est-à-dire les conditions biophysiques et socio-économiques qui influencent leur répartition spatiale, et d'autre part, les règles de décision qui déterminent la nature et la chronologie de chaque pratique et de ses résultats (Clavel *et al.*, 2011).

Comprendre l'organisation spatiale des systèmes de culture est essentiel pour évaluer et améliorer la gestion des paysages agricoles qu'ils composent. Cette compréhension requiert une combinaison entre la description des éléments paysagers et la compréhension des règles qui régissent leur évolution. En essence, la description spatiale porte sur les primitives géographiques telles que les composantes polygonales, incluant les parcelles culturales et autres utilisations des champs, ainsi que des éléments linéaires, dont font partie par exemple les haies, les ravines et les sentiers. Alors que les composantes polygonales sont largement traitées dans les études des occupations du sol, la description des éléments linéaires, notamment en contexte agricole, est limitée à quelques cas spécifiques (e.g., haies, fossés). On peut cependant considérer que les éléments linéaires jouent un rôle important dans l'allocation spatiale et temporelle des cultures et des pratiques agricoles, comme l'influence de routes et de sentiers sur l'accessibilité des parcelles. De ce fait, une description exhaustive est nécessaire pour expliciter et formaliser les règles et les dynamiques d'allocation des cultures à plusieurs niveaux spatiaux, de la parcelle au paysage (Rizzo *et al.*, 2019).

Plusieurs méthodes décrivent exhaustivement les composantes d'un paysage agricole, notamment l'utilisation de techniques de télédétection. Cependant, les paysages agricoles méditerranéens, avec leur fragmentation et leur complexité spécifiques, présentent deux défis majeurs : premièrement, l'application de méthodes basées sur la télédétection nécessite un affinement par des études sur le terrain pour identifier les types pertinents de composantes moins fréquemment décrites dans la littérature scientifique de secteur ; deuxièmement, cette description doit être intégrée dans une approche de géoagronomie pour relier de manière précise les composantes spatiales aux pratiques agricoles qui les influencent (Benoît et *al.*, 2012).

Cette étude a pour **objectif d'évaluer l'impact des éléments linéaires du paysage agricole sur les décisions des agriculteurs en matière de localisation spatiale des cultures en contexte sud-méditerranéen pluvial**. Nous avons examiné ce problème en tant qu'une étude de cas dans un bassin versant agricole situé dans la péninsule du Cap Bon, dans le nord-est de la Tunisie. Cette région présente une diversité d'occupations des sols agricoles et un niveau de fragmentation représentatif des paysages agricoles méditerranéens en système de culture pluviale.

Pour répondre à l'objectif de l'étude, ce rapport est structuré en trois parties. Une première partie d'analyse bibliographique où nous présentons le contexte et la typologie du système de culture fragmentés et des éléments linéaires comme composantes de ce paysage agricole. Cette partie traite également de l'apport des outils de télédétection à la description des éléments linéaires. La deuxième partie, consacrée à présentation de la zone d'étude et la méthodologie adoptée dans ce travail pour la collecte et l'analyse et l'extraction par télédétection des données des éléments linéaires. Dans la troisième partie ont été synthétisés et discutés à la fois les résultats de l'analyse spatiale des données géolocalisées sur les éléments linéaires paysagères présents dans le bassin versant étudié et les résultats de la méthode de télédétection de ces derniers.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Cette partie offre une vue d'ensemble des principales revues littéraires abordant trois domaines essentiels : l'impact de la diversité des pratiques d'utilisation des sols et de la fragmentation sur la gestion des cultures, l'étude approfondie des configurations et des rôles des éléments linéaires au sein des paysages agricoles, ainsi que l'analyse de la valeur ajoutée de la télédétection dans l'identification et l'étude de ces éléments linéaires. Cette exploration bibliographique vise à éclairer et à contextualiser les diverses perspectives et connaissances existantes dans ces domaines, offrant ainsi une base solide pour cette étude.

I. Impact de la diversité des modes d'utilisation des sols et de la fragmentation sur la gestion des cultures

1. Diversité des modes d'utilisation des sols et agriculture durable

Dans les paysages cultivés, la diversité des types d'utilisation des sols et leur disposition spatiale en parcelles ont un impact sur divers processus biophysiques, tels que l'eau, l'érosion, les contaminants et les flux de gènes. Il est essentiel de prendre en compte les effets des modes d'utilisation des sols sur l'environnement et la biodiversité pour une agriculture durable. Ces modes ont également un impact sur la diversité biotique qui, à son tour, influe sur la santé des plantes, la protection des cultures et, en fin de compte, la production agricole (Dalgaard et *al.*, 2003).

La caractérisation des modes d'utilisation des sols et de leurs déterminants est une condition préalable à l'élaboration et à l'évaluation de scénarios alternatifs acceptables d'utilisation des sols, et représente un défi important pour l'agronomie du paysage. Par rapport à l'agronomie générale, l'agronomie du paysage se concentre sur les interactions entre les configurations spatiales des pratiques agricoles et leurs interactions avec les ressources naturelles dans la conception des systèmes de cultures dans une zone d'intérêt (Benoît et *al.* 2012).

Une zone d'intérêt est une étendue de parcelles adjacentes au cours d'un cycle de culture, cultivées avec une culture spécifique ou un mélange de cultures. Il peut également s'agir d'une zone continue de champs adjacents avec une séquence de cultures particulière ou une combinaison de séquences de cultures, chaque séquence étant identifiée par une succession de cultures fixe ou flexible ou une combinaison de séquences de cultures qui se répètent au fil du temps (Benoît et *al.* 2012).

2. Modèles d'utilisation des sols agricoles

Deux approches principales ont été établies dans le domaine de l'agronomie du paysage en ce qui concerne les modèles d'utilisation des sols :

Le premier type d'approche est centré sur les règles. Elle suppose que les modèles de distribution des cultures au niveau du paysage sont le résultat des décisions des agriculteurs au sujet de l'allocation des cultures aux champs en tenant compte du contexte biophysique. Les études se sont concentrées alors sur la caractérisation de la répartition spatio-temporelle des cultures dans les champs par les agriculteurs et sur leurs déterminants. L'objectif est de comprendre comment et pourquoi les cultures choisies par les agriculteurs sont réparties chaque année entre les différents champs agricoles de leurs exploitations et se succèdent dans le temps au sein d'un même champ. Dans ces études, les décisions d'allocation des cultures des agriculteurs sont généralement exprimées sous forme de règles de décision. Ces études reposent principalement sur des données obtenues à partir d'enquêtes auprès des agriculteurs, d'avis d'experts, d'analyses documentaires ou d'une combinaison des trois. Les connaissances acquises peuvent ainsi être utilisées pour simuler la répartition spatiale des cultures ou des séquences sur une matrice de champs réels ou virtuels (Thenail et *al.*, 2009 ; Joannon et *al.*, 2008; Peltonen-Sainio et *al.*, 2017; Sorel et *al.*, 2010).

Le deuxième type d'approche est centré sur les régularités observables. Cette approche vise à décrire des modèles spatio-temporels au niveau du paysage en utilisant une série temporelle de données de localisation des cultures obtenues à partir d'un recensement ou de la télédétection. Par exemple, en utilisant des données de localisation des cultures acquises par télédétection et recoupées dans un système d'information géographique, Biarnés et *al.* (2021) ont mentionné que Martínez-Casasnovas et *al.* (2005) ont cartographié des unités homogènes en ce qui concerne la fréquence des cultures principales sur plusieurs cycles de cultures successives. Sur la base de l'exploration de données impliquant des méthodes de regroupement spatial et temporel, d'autres études ont segmenté le paysage en unités homogènes qui présentent des combinaisons similaires de successions d'utilisation des sols (Thenail et *al.*, 2009; Joannon et *al.*, 2008; Peltonen-Sainio et *al.*, 2017; Sorel et *al.*, 2010).

La combinaison de ces deux types d'approches peut permettre de mieux caractériser et comprendre les modes d'occupation des sols. Comme le montrent Schaller et *al.* (2012), dans une étude menée sur le paysage de la plaine de Niort en France, les régularités stochastiques du paysage identifiées par la fouille de données s'expliquent en partie par des règles de décision partagées par un ensemble d'agriculteurs concernant l'allocation des cultures aux champs.

Les contraintes et les possibilités techniques, économiques et sociales auxquelles les agriculteurs sont confrontés déterminent l'éventail des possibilités pour l'attribution des cultures aux champs. Les principaux facteurs du choix des cultures et de l'utilisation des sols pour différentes cultures sont les suivants :

- **Facteurs environnementaux.** Les facteurs biophysiques, tels que les précipitations, la température, la qualité du sol, la topographie, ainsi que les facteurs anthropiques tels que la taille des parcelles, leurs géométries, les utilisations agricoles voisines, la proximité au siège de l'exploitation et l'accès à l'eau, sont des facteurs environnementaux essentiels à considérer dans le processus de décision lié à la répartition des cultures.
- **Séquence Des cultures.** La fréquence à laquelle les cultures peuvent être alternées dans un champ donné est également un facteur important pour expliquer et comprendre les choix des agriculteurs dans la formalisation des systèmes de culture. La gestion des séquences des cultures est nécessaire pour préserver la santé des sols et maintenir leur productivité à long terme.
- **Considérations économiques.** Les contraintes et objectifs économiques de l'exploitation, tels que les ressources en main-d'œuvre, l'équipement disponible et la stratégie économique de l'exploitant, influencent grandement les choix de cultures et leur distribution.
- **Objectifs personnels des agriculteurs.** Les objectifs individuels des agriculteurs, qu'il s'agisse d'optimiser les rendements, de diversifier les cultures ou de répondre à des besoins spécifiques de leur exploitation, jouent un rôle central dans le processus de prise de décision.
- **Contexte socio-économique.** Les fluctuations des prix sur le marché, ainsi que l'existence, l'accessibilité et la configuration du système de conseil sont deux exemples du contexte socio-économique qui exerce également une influence significative sur les décisions concernant la répartition des cultures.

L'analyse et la prise en compte de ces facteurs sont essentielles pour élaborer une stratégie de répartition des cultures qui soit à la fois efficace et durable (Schaller et *al.*, 2012 ; Thenail et *al.*, 2009 ; Joannon et *al.*, 2008; Peltonen-Sainio et *al.*, 2017; Sorel et *al.*, 2010).

3. Organisation spatiale agricole et allocation des cultures aux champs

Des études supposent implicitement que l'allocation des cultures aux champs est planifiée au niveau de l'exploitation, en tenant compte des préférences de l'agriculteur, ainsi que d'une série de contraintes et d'opportunités. Ces décisions peuvent aboutir à des groupes de champs adjacents présentant la même séquence de cultures. Un tel résultat dépend de la distribution spatiale des facteurs d'attribution des séquences de cultures dans la mosaïque de champs, ainsi que de la spécialisation des séquences de cultures en fonction des facteurs qui leur sont attribués (Burel, 2005 ; Castellazzi et *al.*, 2007).

3.1. La séquence collective des cultures

La séquence collective des cultures, sujet d'une exploration grandissante, révèle la possibilité intrigante de groupes de champs voisins présentant des séquences de cultures identiques. Cette dynamique est introduite par Biarnes et *al.* (2021) sous le terme de séquences collective des cultures, définie comme l'organisation et la gestion des séquences de cultures dans un ensemble de champs répartis parmi plusieurs exploitations agricoles. Cette approche diffère notamment de la gestion individuelle des séquences de cultures au sein d'une seule exploitation. Malgré son importance pour la compréhension des dynamiques des paysages agricoles, l'étude des séquences collectives des cultures et de ses modèles spatiaux reste encore largement sous-explorée, excepté pour les recherches menées dans les domaines de la géographie agricole et de l'histoire du paysage (Biarnés et *al.*, 2021).

3.2. Évolution des systèmes agricoles collectifs : une perspective européenne et méditerranéenne

Des études menées en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique du Nord ont confirmé l'existence de séquences de cultures collectives dans les systèmes agricoles de grandes cultures dans des communautés rurales au fil des siècles. Ces systèmes agricoles ont été pratiqués pendant de nombreux siècles. Ils se caractérisent par des sols arables fortement morcelés et non clôturés, une pratique de la polyculture-élevage, incluant la culture de céréales, des cycles de rotation des cultures sur deux ou trois ans, ainsi que le pâturage ouvert des résidus de culture et des sols en jachère. La gestion collective des séquences de cultures était organisée au niveau du paysage (Wascher et *al.*, 2010 ; Demetriou et *al.*, 2013 ; Mekki et *al.*, 2018).

Le paysage agricole se composait de petits champs agricoles non clôturés, subdivisés en blocs et répartis entre les agriculteurs. Différents sites arables accueillent les cultures, chacun comprenant un ou plusieurs groupes de champs. Les rotations de cultures étaient méticuleusement orchestrées entre ces sites, de manière que les champs voisins, au sein d'un

même bloc, suivent des séquences de cultures bisannuelles ou triennales identiques et synchronisées. La gestion du système de champs ouverts était supervisée par des structures sociales communautaires qui prenaient des décisions sur la planification des activités agricoles dans chaque bloc de culture, notamment les dates de semis, de récolte et de pâturage des résidus de culture (Wascher et al., 2010 ; Demetriou et al., 2013 ; Mekki et al., 2018 ; Biarnès et al., 2021).

3.3. Gestion des séquences de cultures dans certaines régions d’Afrique du Nord

Les séquences de cultures collectives sont toujours pratiquées dans certaines régions d’Afrique du Nord, où des groupes de champs adjacents dans différentes fermes sont utilisés. Dans la région du Rif au Maroc, de telles séquences collectives de cultures sont encore documentées aujourd’hui, comme le rapportent Sabir et al. (2019). Dans le nord-est de la Tunisie, plus précisément dans la péninsule du Cap Bon, des observations récentes des séquences de cultures dans un paysage de champs ouverts et de sols agricoles fragmentées. Cependant, il convient de noter que les séquences de cultures individuelles et collectives coexistent et que leur impact sur les schémas de répartition des cultures au niveau du paysage reste inconnu. L’absence de telles informations limite l’élaboration de scénarios de répartition des cultures sur ce terrain qui s’attaquent aux problèmes de production et d’environnement auxquels sont confrontées ces régions, tels que l’érosion des sols, les ressources en eau limitées, les faibles rendements, etc (Mekki et al., 2018 ; Renes, 2010).

3.4. Règles d’allocation des cultures au niveau de l’exploitation agricole

Comme l’ont montré des études antérieures, la dynamique des modes d’utilisation des champs dans les paysages agricoles est le résultat de règles régissant l’allocation des cultures au niveau de l’exploitation. Ces règles influencent à la fois la séquence des cultures plantées sur plusieurs années et la répartition annuelle des cultures sur les champs agricoles. Une fois les cultures choisies pour une année donnée, ces règles d’allocation impliquent des décisions concernant :

- La surface appropriée pour chaque culture (toutes les parcelles appropriées pour cette culture particulière),
- La surface dédiée à la culture (la surface totale de cette culture sur la parcelle agricole),
- L’intervalle de temps pour replanter la même culture sur la même parcelle,

- Les séquences acceptables de cultures précédentes et suivantes (séquences temporelles de cultures autorisées) (Schaller et *al.*, 2012).

La description de ces règles et l'identification de leurs facteurs sous-jacents sont essentielles pour comprendre les modèles spatiaux et temporels observés de distribution des cultures au niveau du paysage (Schaller et *al.*, 2012). Il s'agit également d'une étape nécessaire pour simuler les schémas paysagers et développer des modèles d'évolution des paysages. Comme l'ont montré la plupart des études susmentionnées, les facteurs à l'origine de ces règles d'affectation des cultures peuvent être internes (par exemple, le système agricole, les caractéristiques des ressources agricoles telles que la parcelles ou la main-d'œuvre) et/ou externes (par exemple, les conditions du marché, le climat) au niveau de l'exploitation (Thenail et *al.*, 2009 ; Schaller et *al.*, 2012 ; Houet et *al.*, 2014).

3.5.Impact de la fragmentation des champs agricoles sur la gestion des cultures

La fragmentation des champs agricoles est une caractéristique commune des paysages cultivés et peut influencer la manière dont les cultures sont réparties au sein des exploitations. La fragmentation des champs agricoles est définie comme la mesure dans laquelle les champs agricoles sont divisées en de nombreux petits champs dispersés dans l'espace. Plusieurs processus peuvent expliquer la fragmentation des champs agricoles, notamment la division des champs et la répartition des zones agricoles. Dans les pays du sud de la Méditerranée, la fragmentation des champs agricoles a été encouragée par des politiques de privatisation des parcelles collectives, des règles juridiques régissant l'héritage, l'urbanisation et le développement d'autres utilisations des sols. Dans ces pays, la taille moyenne des exploitations est généralement faible et il est courant que les champs soient dispersés (Demetriou et *al.*, 2013). Par exemple, des données disponibles pour la Tunisie pour les années 2004 et 2005 montrent que 54 % des exploitations tunisiennes avaient une superficie inférieure à 5 hectares, couvrant 11 % de la superficie agricole totale, 43 % avaient une superficie comprise entre 5 et 50 hectares, couvrant 55 % de la superficie agricole totale, et seulement 3 % avaient une superficie supérieure à 50 hectares, couvrant 34 % de la superficie agricole totale. En termes de fragmentation des champs agricoles, 69% des exploitations tunisiennes de moins de 5 hectares n'avaient qu'un seul bloc de champs, tandis que 62% des exploitations de plus de 5 hectares avaient deux blocs de champs ou plus, un bloc de champs étant défini comme un groupe de champs situés à moins de 500 mètres l'un de l'autre. (Mekki et *al.*, 2018).

De nombreuses études ont démontré l'impact de la fragmentation des champs agricoles sur la gestion et la localisation des cultures, ainsi que ses effets sur les aspects économiques et environnementaux de l'agriculture. Pour les agriculteurs, la fragmentation des champs agricoles peut créer des opportunités liées à la gestion des risques ou à la programmation des cultures. Cependant, elle présente également des défis de gestion, tels que l'efficacité réduite de l'utilisation des machines agricoles en raison de la petite taille et/ou de la forme irrégulière des champs ou les distances variables entre les fermes et les champs. Ces opportunités et contraintes influencent la localisation et la gestion des cultures au niveau de l'exploitation. Par conséquent, la fragmentation des champs agricoles affecte les performances économiques et environnementales des exploitations. La fragmentation des champs agricoles crée également un contexte de proximité géographique, car chaque champ géré par un agriculteur est susceptible d'être entouré de champs gérés par d'autres agriculteurs, ce qui peut entraîner des effets de voisinage et des interactions (Markussen et *al.*, 2016 ; Thenail et *al.*, 2009 ; Mekki et *al.*, 2018).

3.6.Exemple d'un schéma d'utilisation des parcelles dans des paysages semi-arides fragmentés

Une étude menée par Mekki et *al.* (2018) sur le bassin versant du Lebna s'est penchée sur les pratiques agricoles en utilisant une approche combinant des entretiens avec les agriculteurs et la collecte de données sur la répartition spatiale des champs. Cette étude a porté sur un ensemble de 360 champs en 2015, suivi de 355 champs en 2016. Les données recueillies ont inclus, en premier lieu, des informations sur les types de cultures présentes dans ces champs en 2015 et 2016. De plus, les chercheurs ont examiné les utilisations des sols, englobant également les types de cultures, dans les parcelles voisines au cours de l'année 2016. L'analyse des données s'est concentrée sur une distinction entre les champs d'agriculteurs considérés comme isolés et ceux qui ne l'étaient pas. Cette distinction reposait sur deux facteurs interdépendants : la fragmentation des champs agricoles et la répartition spatiale des champs par rapport aux autres éléments de l'exploitation agricole et de la ferme (Mekki et *al.*, 2018).

En utilisant des méthodes d'analyse discriminante, à la fois univariées et linéaires, appliquées aux séquences de cultures et aux cultures observées dans les parcelles voisines, les résultats de cette étude ont révélé un impact significatif de la fragmentation des champs agricoles sur les décisions prises par les agriculteurs concernant l'affectation des cultures. Lorsque les champs étaient isolés, c'est-à-dire lorsqu'ils étaient situés dans un contexte de champs agricoles fragmentées, les agriculteurs mettaient en place des règles collectives d'allocation des cultures en collaboration avec certains de leurs voisins. Ces règles collectives

servaient à gérer les contraintes communes, telles que l'absence d'accès routier aux champs, ce qui se traduisait par un paysage composé principalement de groupements de champs cultivés avec le même type de culture (Mekki et *al.*, 2018).

En revanche, lorsque les champs n'étaient pas isolés, c'est-à-dire lorsqu'ils étaient regroupés à proximité des exploitations, les contraintes liées à l'allocation des cultures étaient principalement influencées par les systèmes de culture en place, avec une forte dépendance aux séquences de cultures préexistantes (Mekki et *al.*, 2018).

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en lumière la nécessité de prendre en compte les contextes collectifs dans lesquels les agriculteurs évoluent pour mieux comprendre les facteurs qui influencent l'allocation des cultures au niveau du paysage, au-delà de l'analyse des règles et des facteurs au niveau du champ et de l'exploitation (Mekki et *al.*, 2018).

Une étude ultérieure menée par Biarnés et *al.* (2021) a pu explorer davantage cette organisation de parcelles fragmentés dans les mêmes zones d'observation. L'étude visait à analyser la corrélation entre la répartition spatio-temporelle des cultures au niveau du paysage et les séquences collectives de cultures. En utilisant à la fois des relevés cartographiques de terrain et des séries chronologiques d'imagerie satellitaire pour déterminer les séquences de cultures sur trois ans, les chercheurs ont classifié ces séquences en différents types de séquences de cultures (Figure 1). La démarche consistait à identifier les groupements de champs adjacents partageant le même schéma de séquences de cultures. Pour cela, une distinction a été établie entre les groupements expliqués par des facteurs individuels des champs et ceux résultant d'une planification collective, en établissant des corrélations statistiques entre les caractéristiques des champs et leur environnement d'utilisation des sols (Biarnés et *al.*, 2021).

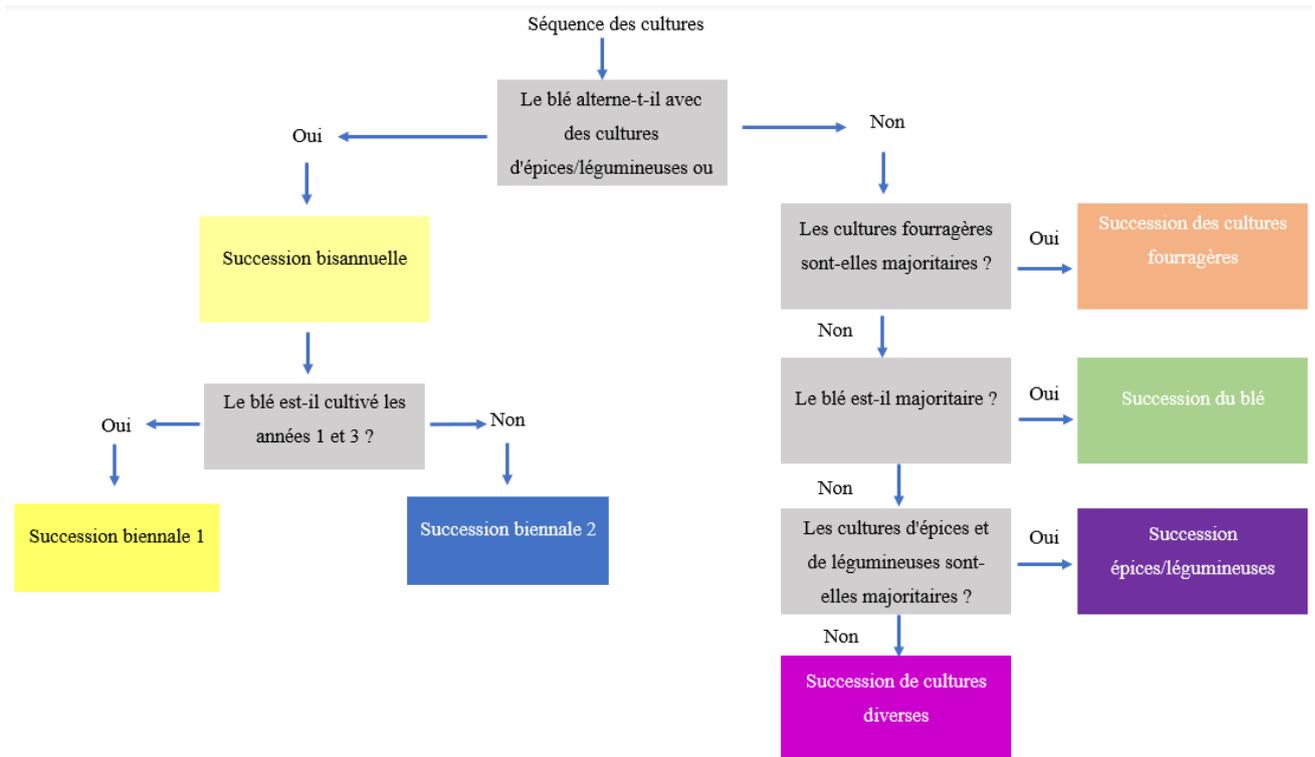


Figure 1 : Règles de classification des séquences de cultures en types de séquences de cultures. La règle "au moins deux années sur trois avec une culture donnée" définit la présence majoritaire de cette culture dans la séquence observée (Biarnés et *al.*, 2021).

Les résultats de cette étude ont mis en évidence que les séquences collectives étaient principalement constituées de cycles biennaux, impliquant la culture du blé alternée avec des légumineuses, des épices ou des cultures fourragères. Ces séquences étaient synchronisées entre les champs adjacents, tous plantés de blé la même année. Les séquences collectives comprenaient également des cycles dominés par les cultures fourragères, représentant environ 40 % des champs et de la superficie totale de la zone d'étude. Cette approche offre un outil pour cartographier les probables séquences collectives et leur intégration dans des scénarios d'utilisation durable des parcelles, en vue d'une meilleure gestion des ressources en sol et en eau au niveau du paysage (Biarnés et *al.*, 2021).

Le modèle développé par les deux études mentionnées a permis de prédire l'existence potentielle de 32 agrégats de champ adjacents dans le bassin versant du Lebna (Figure 2). Chacun de ces clusters de champs adjacents se caractérise par la dominance d'une ou plusieurs cultures dans le cycle de rotation. Cinq types principaux ont été identifiés dont :

- Blé
- Condiments, légumineuses, et autres cultures diverses

- Alimentation animale
- Blé, condiments, légumineuses, et autres cultures diverses
- Blé condiments, légumineuses, et autres cultures diverses et alimentation animale.

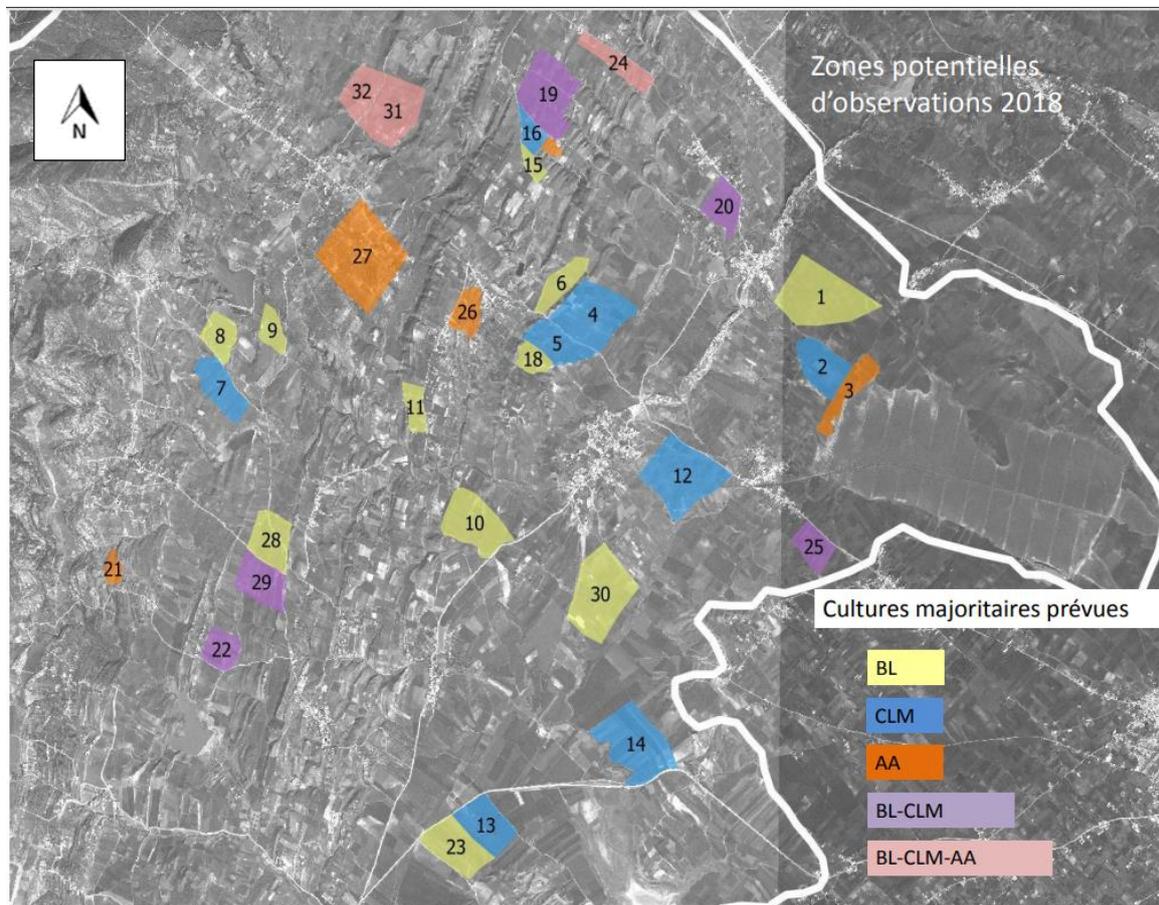


Figure 2 : Carte des agrégats de champs potentiels prédits selon le modèle développé par Biarnés et Mekki (2018).

3.7. Définition d'un agrégat de champs

Un agrégat de champs, également nommé cluster, se compose d'au moins deux champs adjacents. Ces champs adjacents sont caractérisés par la présence du même type ou sous-type de séquence culturale. Il est important de noter qu'un champ dans ce contexte désigne une parcelle agricole gérée par un seul agriculteur avec une seule culture annuelle. Ainsi, lorsque plusieurs de ces champs se trouvent à proximité et partagent une similarité dans leurs pratiques de culture, ils forment un agrégat de champs ou un cluster, se caractérisant d'une gestion agricole plus efficace et cohérente (Biarnés et *al.*, 2021).

Les études précédemment mentionnées ont exploré différentes possibilités concernant les règles d'allocation des cultures et les modèles de gestion des parcelles agricoles, mais aucune n'a examiné le rôle des éléments linéaires et leur degré d'influence au sein de ces modèles. Comme souligné par van der Zanden *et al.* (2013), les éléments linéaires sont répandus dans de nombreux paysages agricoles à travers le monde et présentent des caractéristiques distinctes justifiant une attention spécifique.

II. Configuration et fonctions des éléments linéaires dans les paysages agricoles

1. Éléments linéaires : définition

Les caractéristiques linéaires, également appelées corridors, résultent des efforts constants des agriculteurs pour adapter les paysages aux exigences de la production agricole. En milieu agricole, ils se manifestent sous la forme de fossés, de haies, de bordures de champs, de cours d'eau et d'accotements routiers. Ils servent souvent de limites entre différentes parcelles agricoles. Ces éléments peuvent provoquer tant des ruptures notables dans le paysage que des connexions entre occupations du sol isolées, influençant ainsi de manière significative le comportement environnemental des zones agricoles (van der Zanden *et al.*, 2013). La présence ou l'absence de ces caractéristiques modifie les qualités associées à la configuration du paysage, notamment la connectivité et le degré de fragmentation. Ces caractéristiques peuvent également servir de points notables écologiques et contribuer à la régulation de divers flux, notamment ceux associés à l'eau et aux polluants (Vannier *et al.*, 2011 ; Tansey *et al.*, 2009).

Les haies sont définies comme des rangées d'arbustes ou d'arbres plantés de manière dense pour servir de limites entre les parcelles ou le long des routes. Elles ont une valeur biologique et écologique importante, contribuant à la délimitation des champs, à la création d'habitats pour la faune et la flore, à la protection contre le vent, à la prévention de l'érosion et à l'amélioration de la diversité des paysages et de la biodiversité. De même, les chemins de terre ou de gravier, naturels ou artificiels, facilitent l'accès aux zones agricoles, permettent le transport des récoltes et la circulation des véhicules agricoles (Vannier *et al.*, 2011).

2. Éléments linéaires dans les paysages agricoles

La composition d'un paysage évolue en fonction de la disposition spatiale des parcelles et de leurs connexions. Cette organisation forme une mosaïque où les parcelles définissent l'occupation du sol principale, alors que les caractéristiques linéaires interconnectent ces éléments. Les éléments linéaires, y compris les fossés, les haies et les bordures de champs, font partie de l'infrastructure verte du paysage, en particulier dans les paysages agricoles, où ils ont tendance à servir de limites entre les champs (Van Der Zanden et *al.*, 2013 ; Ståhl et *al.*, 2010).

La littérature concernant les éléments linéaires du paysage, y compris les bordures de champs, contient une multitude d'études de cas, en particulier en ce qui concerne les haies. Plusieurs inventaires à échelle détaillée d'éléments linéaires ont été réalisés dans le cadre de projets européens. De plus, des nombreuses enquêtes, telles que le Countryside Survey britannique et la base de données néerlandaise VIRIS, ont également fourni des connaissances scientifiques précieuses. Les politiques environnementales, en Europe comme dans d'autres pays, reconnaissent de plus en plus l'impact de la fragmentation du paysage sur les habitats et les populations d'espèces (Van Der Zanden et *al.*, 2013 ; Ståhl et *al.*, 2010).

Néanmoins, l'importance des éléments linéaires dans les paysages agricoles nécessite une évaluation et une cartographie complètes de ces éléments. Van Der Zanden et *al.* (2013) ont mentionné que bien que Mùcher et *al.* (2009) aient étudié la modélisation de la longueur des éléments linéaires régionaux sur la base de mesures de l'occupation du sol et du paysage dérivées de données satellitaires, leur approche n'a pas encore été étendue à l'ensemble du territoire européen. Une autre approche, utilisant la télédétection à très haute résolution, a également été utilisée pour cartographier la présence de ces caractéristiques, bien qu'à un coût financier et informatique élevé. Cette découverte souligne la nécessité d'une évaluation approfondie des éléments linéaires du paysage dans les zones agricoles, compte tenu de leur importance pour la biodiversité et l'environnement (Van Der Zanden et *al.*, 2013 ; Tansey et *al.*, 2009 ; Ståhl et *al.*, 2010) .

3. Rôle des éléments linéaires dans les paysages agricoles

Les éléments linéaires du paysage ont des fonctions multiples et fournissent plusieurs services écosystémiques. Ils protègent les sols des effets du vent et du ruissellement de l'eau, diminuent les charges polluantes transportées par le ruissellement et atténuent l'impact du ruissellement sur les masses d'eau réceptrices. Ces éléments linéaires ont également un impact important sur la conservation de la biodiversité. Leur importance a traversé le temps, puisqu'ils ont historiquement servi d'enclos pour les champs, de refuges, de fournisseurs de ressources

telles que le bois de chauffage, d'inhibiteurs de l'érosion et de régulateurs de la vitesse du vent. Si le fil barbelé a parfois remplacé certaines de ces fonctions pour le bétail, d'autres fonctions agricoles persistent, notamment le drainage de l'eau par les fossés et la protection contre le vent par les haies. Les éléments linéaires sont de plus en plus reconnus pour les services écosystémiques essentiels qu'ils fournissent en tant qu'infrastructures écologiques, qui offrent des habitats cruciaux pour le développement des espèces des champs agricoles. Il est donc indispensable d'inclure ces éléments linéaires artificiels dans l'étude des processus de ruissellement et d'érosion dans les petits bassins versants cultivés, d'autant plus que les densités de drainage artificiels présentent des variations spatiales considérables (Thenail, 2002 ; Vannier *et al.*, 2011a ; Tansey *et al.*, 2009 ; Ståhl *et al.*, 2010).

4. Variabilité spatiale des éléments linéaires dans les territoires agricoles

En observant l'expansion des régions agricoles sur des étendus plus larges, il est évident que les caractéristiques des lignes présentent une diversité spatiale importante. Par conséquent, l'hétérogénéité spatiale est désormais intégrée dans les évaluations environnementales et les analyses d'impact pour l'encadrement de ces zones agricoles. Cette approche passe par la génération d'indicateurs de configuration spatiale ou par l'utilisation de modèles géométriques et physiques. Cependant, il est important de noter que ces approches ont principalement été administrées dans des zones restreintes ou ont nécessité des études de terrain approfondies, ce qui limite leur application sur des plus grands étendus. Par conséquent, la capacité à cartographier ces éléments linéaires est un facteur clé pour étendre le diagnostic des zones agricoles sur de grandes surfaces à moindre coût (van der Zanden *et al.*, 2013 ; Thenail *et al.*, 2009 ; Ståhl *et al.*, 2010).

III. Apport de la télédétection dans l'extraction des éléments linéaires

La télédétection a depuis longtemps été considérée comme un outil essentiel pour la planification et le suivi de l'occupation et de l'utilisation des sols. Lorsque l'analyse s'étend au-delà des sites locaux pour englober un étendu plus large de paysages au niveau national, voire international, il devient essentiel de développer des méthodes automatiques et robustes d'observation. Ces méthodes servent à suivre les changements dans le temps et garantir une surveillance efficace de la mise en œuvre des réglementations (Tansey *et al.*, 2009).

L'un des attraits particuliers de la technologie de télédétection par satellite pour les gestionnaires de ressources réside dans sa capacité à fournir des mesures cohérentes des conditions du paysage, permettant ainsi la détection tant des changements brusques que des tendances lentes au fil du temps. Cette détection et caractérisation des changements dans les attributs clés des ressources permettent aux gestionnaires de surveiller la dynamique des paysages sur de vastes étendues, y compris les zones difficilement accessibles ou dangereuses, tout en facilitant l'application de mesures coûteuses au sol ou le déploiement stratégique de ressources pour la surveillance ou la gestion (Biarnès *et al.*, 2021 ; Ståhl *et al.*, 2010).

Pour étendre le diagnostic environnemental des paysages agricoles à des zones larges, il est essentiel de pouvoir cartographier ces éléments linéaires. Les images de télédétection à très haute résolution spatiale, grâce à leur capacité à représenter avec une grande précision les détails géographiques, s'avèrent indispensables pour cette tâche, en raison des dimensions restreintes de ces éléments. La détection d'éléments linéaires se fait généralement par le biais de diverses méthodes, telles que des filtres morphologiques, la classification des pixels, la segmentation ou des algorithmes de drainage lorsque des modèles numériques de terrain sont disponibles (Bailly *et al.*, 2008).

Cependant, il est important de noter que les corridors peuvent être insuffisamment représentés dans le paysage lorsqu'ils sont cartographiés, que ce soit par le biais de la télédétection ou par des méthodes traditionnelles de cartographie sur le terrain. Les cartes de couverture du sol et de la végétation qui ne parviennent pas à rendre avec précision la taille et le nombre des éléments constituent une source d'incertitude dans les modèles à résolution spatiale élevée (Aksoy *et al.*, 2010).

En ce qui concerne la détection des éléments linéaires, il existe un consensus raisonnable : une résolution spatiale inférieure à 4 à 5 mètres est nécessaire. Ils ont affirmé que dans les zones urbaines où la végétation est présente dans de petites parcelles telles que les bandes médianes et les arrière-cours, une imagerie à haute résolution spatiale, comprise entre 0,25 et 10 mètres, est indispensable. De plus, des études ont suggéré qu'une résolution spatiale inférieure à 5 mètres est requise pour capturer des caractéristiques linéaires telles que les corridors de la faune. Pour conclure, les capteurs dotés d'une résolution spatiale plus fine, à l'exemple du capteur multispectral d'IKONOS avec une résolution de 4 mètres, sont mieux adaptés à la détection d'éléments de plus petite taille, tels que la végétation riveraine (Bailly et *al.*, 2008).

D'un point de vue cartographique, ces éléments linéaires du paysage sont difficiles à déterminer sur de grandes surfaces en raison de leur faible épaisseur, de leur configuration spatiale et de l'hétérogénéité du paysage autour de ces éléments. Des études ont montré que les images satellites à haute ou très haute résolution spatiale sont appropriées pour la cartographie automatique des haies. La détection de bandes linéaires de végétation boisée, comprenant des haies et des zones riveraines, a été réalisée avec succès à partir de données SPOT 5 ou d'images Quickbird en utilisant une méthode orientée vers les objets, combinant des critères spectraux, texturaux et de forme. Cependant, malgré la précision de ces résultats, la capacité à acquérir de telles images sur de vastes zones reste limitée en raison des coûts et de l'accessibilité des équipements nécessaires. Il est donc important de continuer à développer des approches de télédétection efficaces pour cartographier ces éléments linéaires dans des paysages agricoles complexes (Levvasseur et *al.*, 2014 ; Vannier et *al.*, 2011 ; Ståhl et *al.*, 2010).

Chapitre II : Matériel et méthodes

Dans cette partie, nous fournirons une vue d'ensemble détaillée de la zone d'étude, en mettant en lumière sa localisation, ses caractéristiques et son importance dans le contexte de notre recherche. De plus, nous décrirons en détail la méthodologie que nous avons employée pour l'échantillonnage et la numérisation des données terrain, en mettant l'accent sur les procédures et les techniques spécifiques utilisées pour collecter les informations nécessaires à notre analyse. Cette section jouera un rôle fondamental dans la validation de nos résultats et dans la reproductibilité de notre recherche.

I. Présentation de la zone d'étude

1. Description géographique et morphologique du bassin versant du Lebna

La zone d'étude appartient au bassin versant du Lebna couvrant 210 km² (36°43'N-36°53'N ; 10°40'E-10°58'E), situé dans le gouvernorat de Nabeul sur la péninsule du cap Bon au nord-est de la Tunisie (Figure 3). Le bassin versant du Lebna est situé sur le versant sud-est du Jebel Abderrahmane et s'étend de 0 à 637 mètres d'altitude. Du point de vue géomorphologique il est divisé en trois zones (amont, intermédiaire et aval) qui recourent également des différences géologiques et d'occupation et utilisation des sols. Un gradient continu d'écosystèmes est observé le long du transect amont-aval. La partie amont, qui s'étend de 200 à 637 mètres au-dessus du niveau de la mer, représente le gradient le plus abrupt du bassin versant. La zone intermédiaire, dont l'altitude est comprise entre 80 et 200 m d'altitude, correspond aux collines du Lebna et comprend un réseau de rivières intermittentes connues sous le nom d'oueds. La zone aval, dont l'altitude varie entre 0 et 80 m d'altitude, comprend la plaine du Lebna (Biarnès et *al.*, 2021).

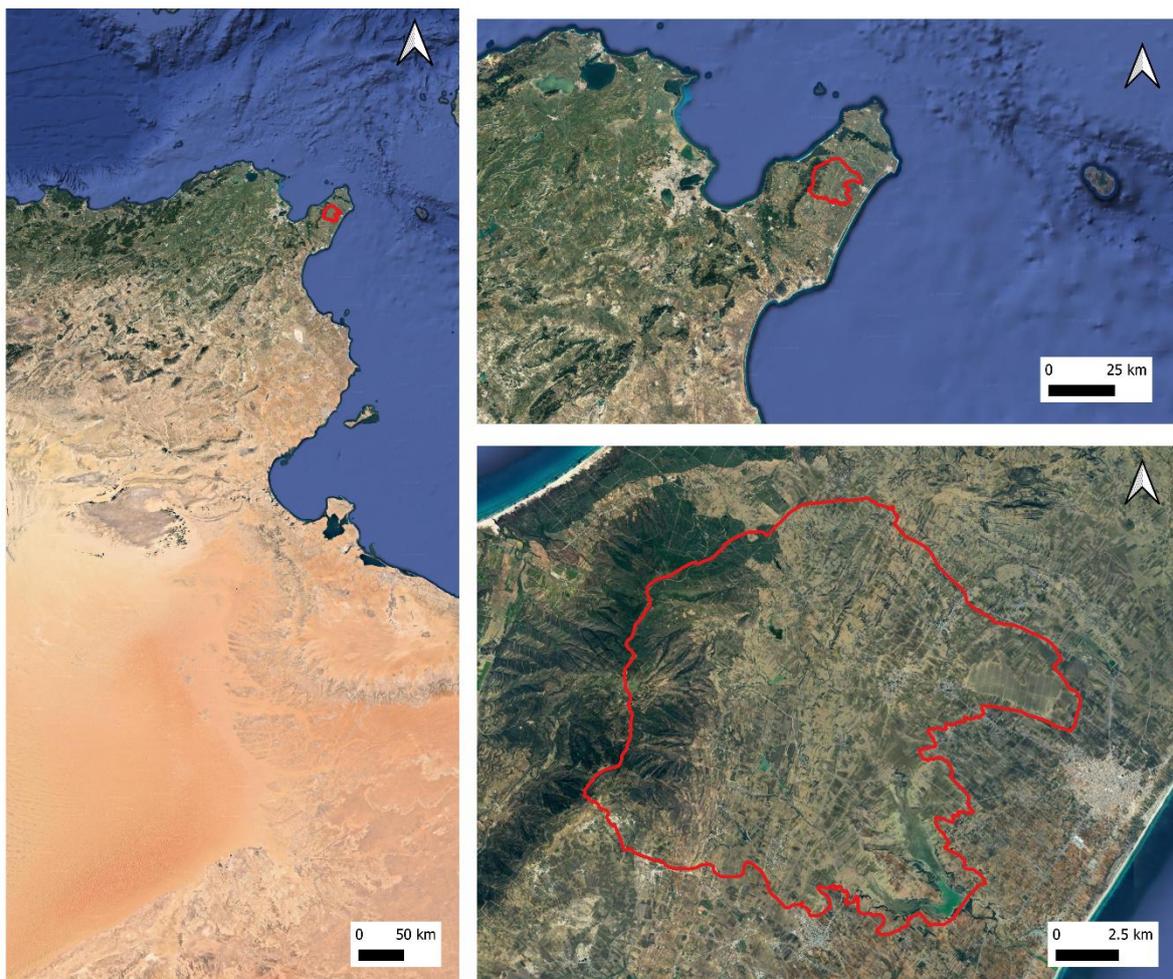


Figure 3: Carte de localisation du bassin versant du Lebna au Cap Bon en Tunisie sur un fond Google Earth Engine en avril 2023 dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

2. Les caractéristiques climatiques de la zone d'étude

Le climat de cette région se situe entre le subhumide et le semi-aride. D'aval en amont, les précipitations et l'évapotranspiration moyennes annuelles (culture de référence de *Penman-Monteith*) varient respectivement de 450 mm à 800 mm et de 1000 à 1500 mm (Biarnès et *al.*, 2021).

3. Classes d'utilisation des champs dans la zone d'étude

Environ un tiers de la superficie du bassin versant est couvert par la végétation naturelle (Figure 4, Tableau 1). Ces zones de végétation naturelle comprennent les parties les plus escarpées du bassin versant, ainsi que les rives des retenues collinaires, des lacs et des oueds. Les terres arables occupent 57 % de la superficie du bassin versant. Les systèmes agricoles sont

principalement basés sur la polyculture pluviale et l'élevage. Comme d'autres systèmes agricoles pluviaux en Afrique du Nord, l'agriculture du Lebna est principalement axée sur la production de céréales, bien que le climat local permette la diversité des cultures. Les cultures annuelles couvrent 49% de la superficie du bassin versant et comprennent les céréales (principalement le blé), les cultures fourragères (principalement l'orge, l'avoine et le triticale), les épices (principalement la coriandre) et les légumineuses (principalement les fèves). Les cultures pérennes, principalement constituées d'oliviers, couvrent 8 % de la superficie totale du bassin versant. L'élevage comprend l'élevage de bovins, d'ovins et de caprins. Le bétail est nourri avec des aliments produits à la ferme, de la végétation naturelle et des compléments alimentaires externes. Trois formes principales de pâturage se distinguent : le pâturage des cultures fourragères, celui des résidus de culture, et enfin, le pâturage de la végétation naturelle (Mekki et *al.*, 2018 ; Biarnès et *al.*, 2021).

Tableau 1 : Répartition des classes d'utilisation des sols dans la zone d'étude. Les pourcentages sont relatifs à la superficie totale de la zone d'étude (Biarnès et *al.*, 2021).

Type d'occupation de sol	Classe d'occupation de sol	Couverture (en %)
Espaces naturels et semi-naturels	Sebkha, lacs artificiels, oueds	34
	Forêts, arbustes, pâturages herbacés, affleurements de grès	6
Zones scellées artificielles	Routes, pistes, zones urbaines	3
Culture pluviale mixte	Cultures annuelles	49
	Verger	8

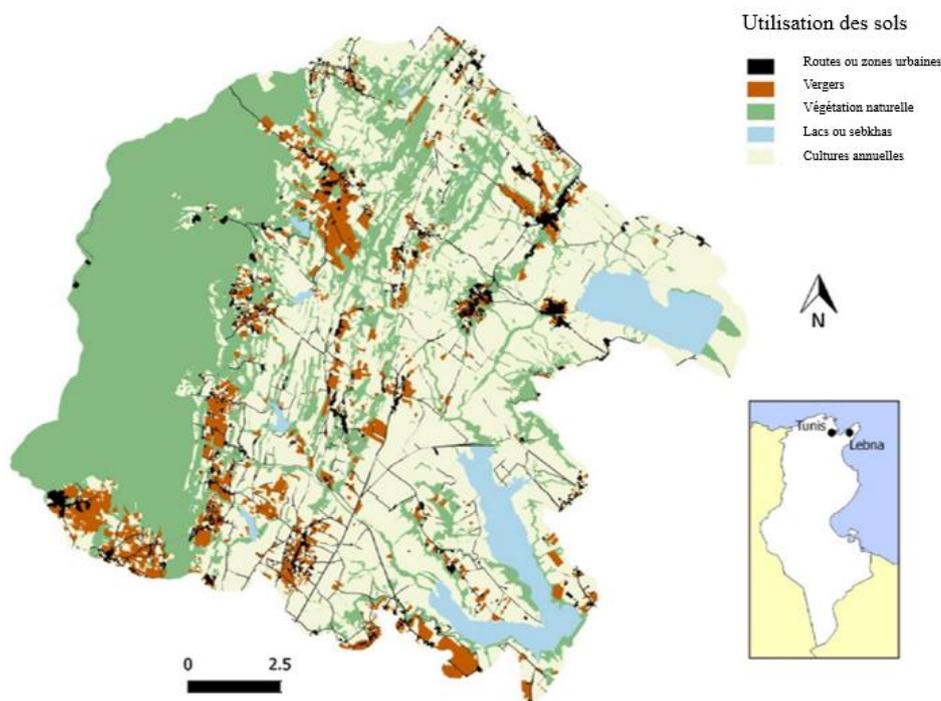


Figure 4 : Répartition des classes d'utilisation des sols dans la zone d'étude. Les classes d'utilisation des sols ont été classifiées manuellement et numérisées à une résolution spatiale fine à partir d'une image Spot datée du 21/03/2016 et d'une image Google Earth datée du 24/05/2016. La carte inclut les caractéristiques ayant des dimensions supérieures à 10-15 mètres. Les routes secondaires étroites, les sentiers, et les étroites bandes de végétation naturelle ne sont pas prises en compte (Mekki et *al.*, 2018).

La distribution des sols présente un schéma complexe en relation avec la géologie du bassin versant, qui présente une alternance de grès et de marnes. Comme plusieurs études ont pu démontrer, il existe une relation entre la texture de surface du sol et les propriétés souterraines du sol. Les sols développés sur les affleurements de grès au sommet des pentes sont peu profonds, avec une texture sableuse (régosols) et une très faible capacité de rétention d'eau du sol. Après les pentes, les sols se développent sur les marnes et leur profondeur varie en fonction de la pente, avec un maximum sur la plaine alluviale dans la partie inférieure de la zone. Les textures sont généralement supérieures à 40 % d'argile (cambisols ou vertisols argileux et calciques), et la capacité de rétention d'eau du sol n'est pas restrictive pour les cultures pluviales classiques (Biarnès et *al.*, 2021 ; Mekki et *al.*, 2018).

4. Caractéristiques des pratiques agricoles dans le bassin versant du Lebna

Dans le bassin versant du Lebna, le paysage cultivé consiste en une mosaïque de très petits champs agricoles, la taille moyenne des champs étant inférieure à 1 hectare. Le bassin versant du Lebna se caractérise par des champs ouverts, dont la plupart ne sont pas clôturés et ne sont pas directement accessibles par des routes. En raison de la petite taille des exploitations, la plupart des agriculteurs disposent d'un équipement limité et confient donc les opérations mécanisées à des entrepreneurs agricoles. Les cycles de culture s'étendent de l'automne à l'été (Figure 5), et le calendrier des cultures varie en fonction de la culture spécifique, les céréales étant souvent cultivées en rotation avec des légumineuses ou des épices pour profiter des avantages tels que la fixation de l'azote (dans le cas des légumineuses) et pour rompre les cycles des ravageurs ou des mauvaises herbes (Biarnès et *al.*, 2021 ; Mekki et *al.*, 2018).

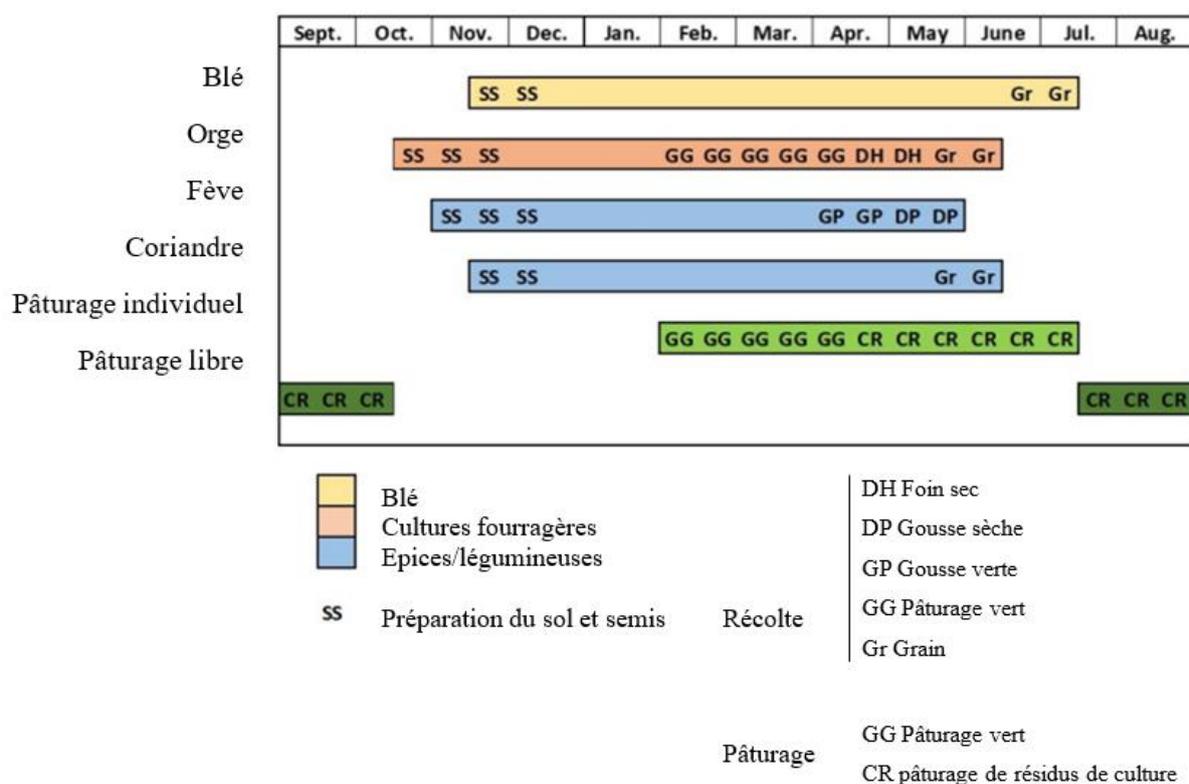


Figure 5 : Calendrier des principales activités agricoles pour les cultures prédominantes au Lebna (Biarnès et *al.*, 2021).

II. Sélection des données

1. Inventaires des données existantes

Cette étude se concentre sur l'analyse des rôles des éléments linéaires des paysages agricoles dans le bassin versant du Lebna. Pour parvenir à une compréhension approfondie, il est impératif d'exploiter les données déjà disponibles, qu'elles proviennent des études antérieures du laboratoire ou des références documentées dans la littérature existante. Les données géolocalisées identifiées sur l'occupation du sol couvrent la période depuis l'année agricole 2015/2016, à l'exception des années 2018/2019 et 2019/2020, pour lesquelles ces données ne sont pas disponibles (Tableau 2). D'autres données identifiées concernent les agrégats de champs, les zones urbaines et quelques éléments linéaires (Tableau 2).

Tableau 2 : Données géolocalisées disponibles, leur date de création ou collecte et leur sources respectives.

Données disponibles	Année agricole	Format	Source(s)
Occupation de sol	2015 /2016	Vecteur : polygone	Biarnés et <i>al.</i> (2021)
Occupation de sol	2016 /2017	Vecteur : polygone	Biarnés et <i>al.</i> (2021)
Occupation de sol	2017/2018	Vecteur : polygone	Biarnés et <i>al.</i> (2021)
Occupation de sol	2020/2021	Vecteur : polygone	Base de données du laboratoire
Occupation de sol	2021/2022	Vecteur : polygone	Base de données du laboratoire
Agrégats de champs	2018	Vecteur : polygone	Base de données du laboratoire
Zone urbaine	2012	Vecteur : polygone	Base de données du laboratoire
Éléments linéaires	2012	Vecteur : lignes	Base de données du laboratoire

En ce qui concerne les données concernant les éléments linéaires disponibles dans la base de données, elles englobent le réseau hydrologique couvrant une distance totale de 154834 km, le réseau routier s'étendant sur 10501 km, et des informations relatives à la zone urbaine d'une superficie $S = 11161 \text{ km}^2$. Ces données sont représentées dans la carte des éléments linéaires du bassin versant du Lebna (Figure 6).

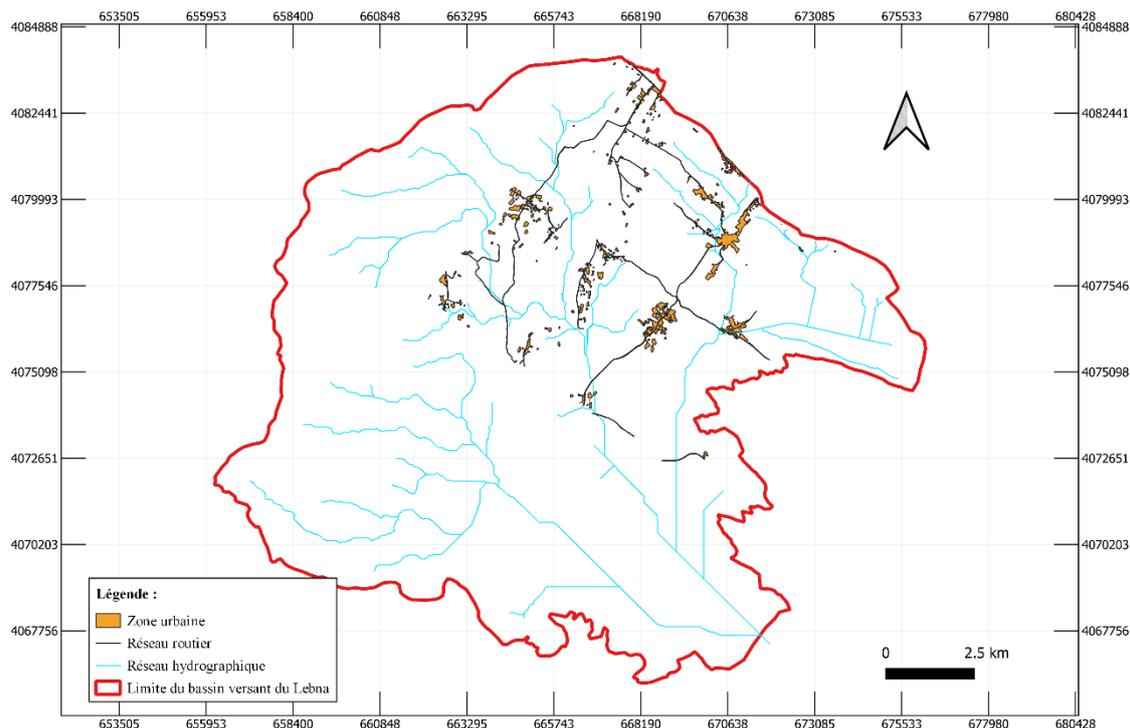


Figure 6 : Carte des données disponibles sur les éléments linéaires du bassin versant de la Lebnah élaborée dans le système de projection EPSG :32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

Ainsi, pour mener cette étude à bien, il est essentiel de collecter non seulement des données concernant les éléments linéaires des paysages agricoles présents dans le bassin du Lebnah pour l'année agricole 2022/2023, mais également de mettre à jour les informations relatives à l'occupation du sol pour cette même période.

2. Choix des zones d'échantillonnage

Pour élaborer une carte des éléments paysagers agricoles dans le bassin versant du Lebnah et étudier leur impact sur les pratiques agricoles, il est nécessaire de collecter des données géolocalisées. Cependant, en raison de contraintes telles que la disponibilité de ressources humaines, financières et temporelles, il a été nécessaire de constituer un échantillon représentatif de ces éléments. De plus, le choix des zones de collecte des données est très important pour la réussite de cette étude. Ces zones doivent non seulement être représentatives des éléments linéaires présents dans le paysage agricole du bassin versant du Lebnah, mais elles doivent également tenir compte des contraintes liées à la collecte sur le terrain, telles que la disponibilité de ressources humaines et financières, le temps nécessaire et les risques.

Les travaux de Mekki et *al.* (2018) et de Biarnés et *al.* (2021), concernant l'analyse des agrégats de champs au niveau du bassin versant du Lebna est un point de départ essentiel pour déterminer les zones de collecte appropriées et pour guider la sélection des emplacements de collecte de données. Ces travaux ont permis de prendre en compte les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Il existe une disparité entre les éléments linéaires observés au sein des agrégats de champs et ceux observés en dehors des zones identifiées comme agrégat de champs, ce qui explique la mise en place de certaines parcelles sous forme de cluster.

Hypothèse 2 : Il existe une divergence entre les éléments linéaires présents dans les agrégats de champs situés dans les zones de collines par rapport à ceux présents dans les agrégats de champs localisés dans les zones de plaine du bassin versant du Lebna.

Hypothèse 3 : Il y a une variation entre les éléments linéaires observés dans les différents types d'agrégats de champs au sein du bassin versant du Lebna.

Ces hypothèses suggèrent que des différences significatives peuvent être identifiées en ce qui concerne les éléments linéaires dans les zones d'agrégats de champs par rapport à celles en dehors des agrégats de champs, ainsi qu'entre les zones de collines et les zones de plaine, et enfin, entre les différents types d'agrégats de champs au sein du Lebna. Elles constituent la base de l'étude pour explorer ces variations et leurs implications dans la configuration spatiale des pratiques agricoles dans la région.

Afin de répondre à ces hypothèses, le processus de sélection des zones d'échantillonnage a suivi un système de règles (Figure 7). Tout d'abord, il était essentiel que les zones choisies présentent à la fois des agrégats de champs identifiés et des zones en dehors de ces agrégats de champs. De plus, cette sélection devrait garantir une représentativité équilibrée des zones d'échantillonnage à la fois dans les zones collinaires et dans les plaines du bassin versant. Enfin, il était important de prendre en compte la représentativité de tous les types d'agrégats de champs identifiés par Biarnés et *al.* (2021).

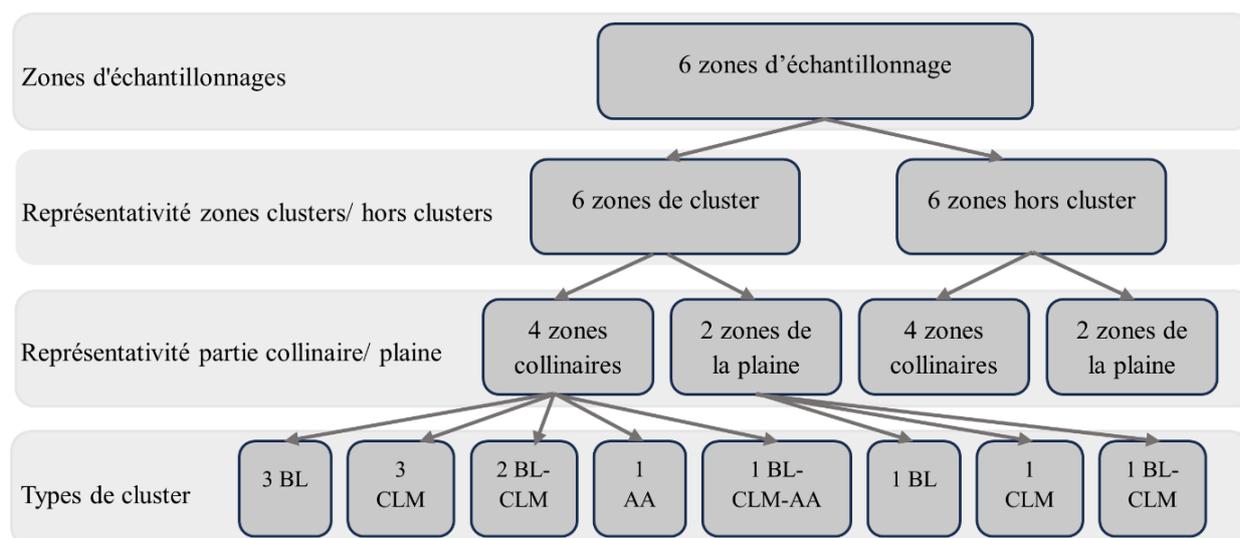


Figure 7 : Critères de sélection des zones d'échantillonnage pour l'étude des éléments paysagers agricoles dans le bassin versant de la Lebna (BL : Blé, AA : Alimentation Animale et CLM : Condiment, Légumineuses, et autres cultures diverses).

Les zones sélectionnées pour la collecte de données se répartissent en 6 zones contenant chacune des agrégats de champs identifiés et des zones en dehors de ces clusters de champs. Parmi les 6 zones de cluster de champs, le choix s'est porté sur 4 zones distinctes dans la partie collinaire du bassin versant, couvrant au total 10 clusters de champs répartis en 3 clusters consacrés à la culture de blé, 3 clusters dédiés aux condiments, aux légumineuses et au maraîchage, 2 clusters combinant blé et condiments, légumineuses et maraîchage, ainsi qu'un seul cluster dédié à l'alimentation animale. En ce qui concerne la partie plaine, 2 zones ont été choisies, englobant au total 3 clusters comprenant un cluster de blé, un cluster de condiments, légumineuses et maraîchage, et un cluster combinant blé et condiments, légumineuses et maraîchage.

Les zones en dehors des clusters sont des zones supplémentaires d'observations proches et/ou adjacentes aux zones des clusters. Leur inclusion vise à étudier les différences dans les éléments linéaires paysagers présents dans des zones géographiquement proches mais qui présentent potentiellement une organisation différente.

3. Distribution spatiale des zones échantillonnées

La superficie totale des zones couvertes par l'échantillonnage est évaluée à 7,75 km². Cette surface se répartit en clusters échantillonnés, occupant 3,35 km², tandis que les zones hors clusters échantillonnées s'étendent sur 4,40 km², réparties en 6 zones distinctes. De plus, l'étude identifie un total de 13 clusters échantillonnés (Figure 8).

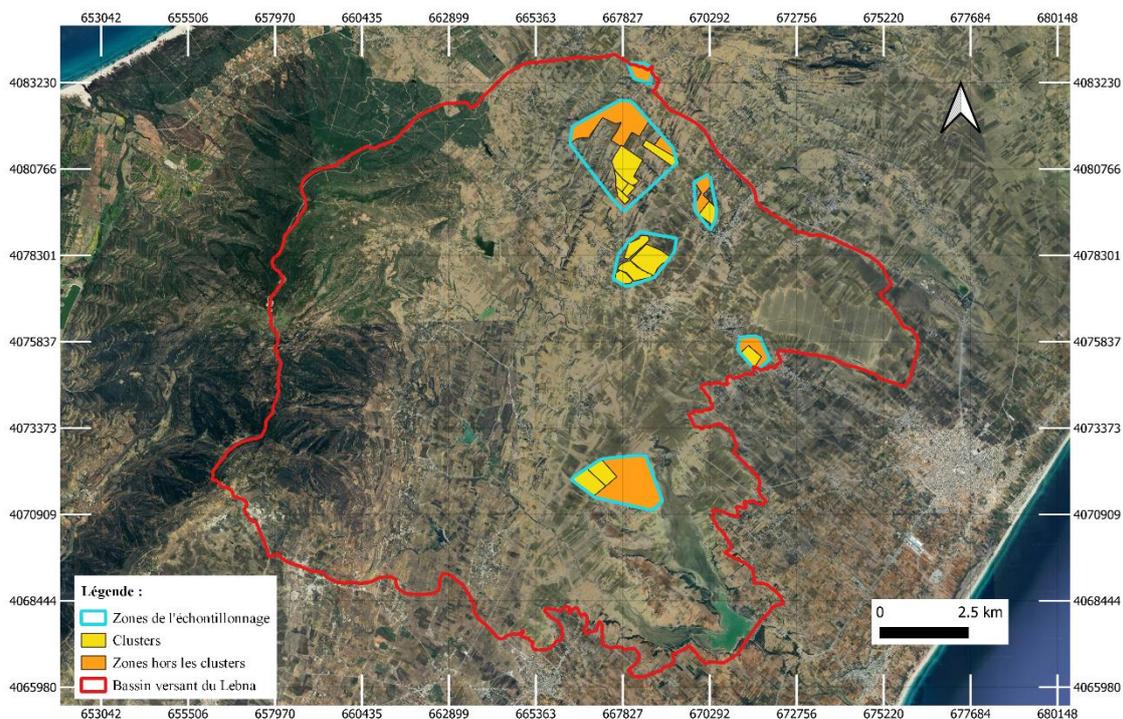


Figure 8 : Carte de la distribution des zones de l'échantillonnage sur une image Pléiades du 02/02/2022 élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

III. Méthode de collecte des données terrain

Pour la collecte de données sur les éléments linéaires, plusieurs méthodes ont été adoptées pour capturer avec précision ces caractéristiques sur le terrain. Trois méthodes de traçage ont été suivies pour tenir comptes des différentes conditions d'accessibilité des éléments sur le terrain ou de leur configuration spatiale :

- **Points tout le long de l'élément linéaire :** cette méthode implique la création d'une ligne en reliant plusieurs points ou nœuds collectés le long de l'élément linéaire. Elle est particulièrement utile pour capturer des détails précis sur des éléments linéaires long, connecté et/ou complexes ;

- **Deux nœuds aux extrémités** : dans ce cas, la ligne est tracée en reliant simplement deux nœuds collectés aux extrémités de l'élément linéaire. C'est une option pratique pour les linéaires droits, court et/ou connexes ;
- **Un seul point à l'extrémité du tronçon**. Dans certains cas, où la précision absolue est moins importante, un tronçon de ligne peut être tracé en utilisant un seul point collecté à l'extrémité de cet élément linéaire surtout pour les routes et les pistes qui sont visibles sur les images satellitaires.

Ces diverses méthodes permettent une approche flexible pour la collecte de données sur les éléments linéaires, s'adaptant aux caractéristiques spécifiques de chaque site et aux objectifs de collecte de données, tout en garantissant une précision spatiale appropriée.

IV. Descripteurs des éléments linéaires

Les éléments linéaires qui composent les paysages présentent des caractéristiques morphologiques et thématiques distinctes. Pour mieux caractériser ces éléments dans la région du Lebna et faciliter leur classification, plusieurs descripteurs ont été élaborés avant et après les campagnes de collecte sur le terrain (exemples en Annexe 1). Cette démarche de description a été spécifiquement adaptée au cas d'étude du Lebna en raison du manque de références dans la littérature concernant la caractérisation des éléments linéaires étudiés. Parmi ces descripteurs figurent :

1. Le Type

Le descripteur "Type" a été sélectionné pour détailler la catégorie à laquelle appartient chaque élément linéaire, permettant ainsi de faciliter d'éventuelles analyses. Les types d'éléments linéaires considérés sont les suivants :

- Tronçon de route
- Tronçon de piste
- Tronçon de sentier
- Tronçon de haie
- Autres tronçons délimitant les parcelles
- Tronçon d'oued

2. La visibilité

Le descripteur Visibilité a été retenu à la suite des observations effectuées sur le terrain, où certains éléments linéaires étaient visibles sur place mais ne figuraient pas sur la carte générée à partir de l'image satellite Pléiades de février 2022. Ce descripteur vise à catégoriser :

- Visibles à la fois sur le terrain et sur l'image
- Visibles sur le terrain mais absents sur l'image
- Visibles sur l'image mais non observés sur le terrain

3. La nature

Le descripteur "Nature" distingue la provenance des éléments linéaires :

- Naturelle : Ces éléments linéaires résultent de processus naturels, tels que les oueds ou les ravines.
- Anthropique : Ces éléments linéaires découlent d'interventions humaines ou de processus influencés par l'activité humaine, comme les pistes, les routes, les limites des parcelles, les haies ou les fossés.

4. La pérennité

Le critère "Pérennité" évalue la longévité des éléments linéaires :

- Permanent : Ces éléments demeurent en place pendant une période dépassant les trois années agricoles.
- Temporaire : Ces éléments restent présents pour une durée d'au moins une à trois années agricoles.

La référence à une durée de trois années agricoles comme seuil pour définir la permanence des éléments linéaires est basée sur les travaux de Biarnés et al. (2021), qui ont réussi à identifier les groupements de champs après trois années de séquences culturales successives.

5. L'accessibilité

Le critère "accessibilité" se réfère à la capacité de l'élément linéaire à être traversé ou franchi par des personnes, des véhicules ou des animaux. Cela concerne la facilité ou la difficulté à se déplacer le long de cet élément linéaire, que ce soit une route, un sentier, une clôture ou tout autre type.

6. La connexion

Le critère "Connexion" des éléments linéaires évalue leur relation avec d'autres éléments du paysage.

7. Le degré de connexion

Le degré de connexion des éléments linéaires est évalué sur une échelle hiérarchisée. Les routes sont classées en premier niveau, représentées par le degré 1. Les éléments connectés directement à ces routes sont classés en degré 2, puis les éléments connectés aux éléments de degré 2 sont classés en degré 3, et ainsi de suite jusqu'à un degré 4. Enfin, les éléments connectés à des éléments de degré 4 ou plus sont représentés par le symbole "+5". Cette échelle permet de définir la profondeur et l'étendue de la connexion entre les différents éléments linéaires, offrant ainsi une vue détaillée de la structure et de l'interconnexion du réseau dans le paysage étudié.

V. Le modèle conceptuelle des éléments linéaires

1. Définitions et objectif

Un modèle conceptuel de données est une représentation structurée des informations et des relations entre ces informations au sein d'un système d'information. Il sert de schéma conceptuel pour décrire les données, leurs attributs et les interactions entre elles. En général, un modèle conceptuel de données est représenté sous forme de diagrammes englobant les éléments suivants :

- Les entités représentent des objets du monde réel ou conceptuel. Ce sont des éléments distincts, comme des personnes, des lieux, des objets ou des concepts, qui ont des propriétés spécifiques.
- Les attributs sont les propriétés ou caractéristiques des entités. Chaque entité possède des attributs qui décrivent ses caractéristiques.
- Les relations décrivent les interactions et les liens entre les entités. Elles représentent les associations entre les entités et montrent comment elles sont connectées les unes aux autres. Par exemple, une relation entre les entités Livre et Emprunteur pourrait être "Emprunté par", indiquant qu'un emprunteur peut emprunter plusieurs livres.
- La cardinalité spécifie le nombre d'instances dans une relation. Elle définit le nombre d'entités associées à une autre entité dans une relation donnée (Al-Fedaghi, 2021).

L'objectif principal d'un tel modèle est de fournir une vision claire et précise de la structure des données, des contraintes et des règles métier qui régissent leur organisation, afin

de faciliter la conception et le développement de bases de données ou de systèmes d'information. Il constitue un outil essentiel pour la communication entre les différents acteurs impliqués dans la conception et la gestion des données au sein d'un projet (Al-Fedaghi, 2021).
Modèle conceptuel des données des éléments linéaires du bassin versant du Lebna

2. Model conceptuel des données du bassin versant de Lebna

Le schéma conceptuel exposant les éléments linéaires du bassin versant du Lebna, (Figure 9), révèle la diversité des zones présentes, comprenant des zones urbaines, des zones forestières, et des réservoirs d'eau. Chaque zone peut abriter un ou plusieurs éléments linéaires.

Par ailleurs, le bassin versant inclut des zones agricoles, organisées en clusters ou juxtaposées de façon non structurée, comportant elles-mêmes des éléments linéaires et des parcelles agricoles. Chaque parcelle est gérée par un seul opérateur, possiblement le propriétaire lui-même ou un gestionnaire dédié, supervisant une à plusieurs parcelles simultanément. Cependant, la nature exacte de la connexion entre l'opérateur et les clusters reste indéterminée malgré son existence manifeste, car aucune étude n'a explicitement validé cette relation.

Il est évident que les parcelles agricoles sont cultivées avec différents types de cultures, souvent sous forme d'associations. Malgré cela, notre étude n'a pas pu déterminer clairement la relation entre l'opérateur et le type de culture en raison de la complexité des pratiques agricoles excédant le cadre de cette recherche.

Chaque culture implique au moins une opération agricole, mais le processus de sélection de ces opérations, incluant les types, les mécanismes, les intrants et les dates d'application, demeure incertain. Il reste à déterminer si ce processus relève d'une décision individuelle ou collective.

Une relation entre les éléments linéaires et les pratiques agricoles a été remarquée. Par exemple, certaines pratiques semblent être restreintes aux parcelles entourées par des éléments linéaires. Par exemple, les pratiques telles que le fauchage ou le désherbage manuel se limitent à une seule parcelle, sans affecter les autres. Néanmoins, les raisons derrière cette relation et son impact sur l'organisation des parcelles en clusters restent floues.

En conclusion, cette analyse souligne la nécessité d'approfondir les liens non identifiés dans le bassin versant du Lebna. Plusieurs aspects clés nécessitent des investigations approfondies sur le terrain. Les lacunes identifiées exigent une exploration approfondie pour une compréhension plus précise de ces relations.

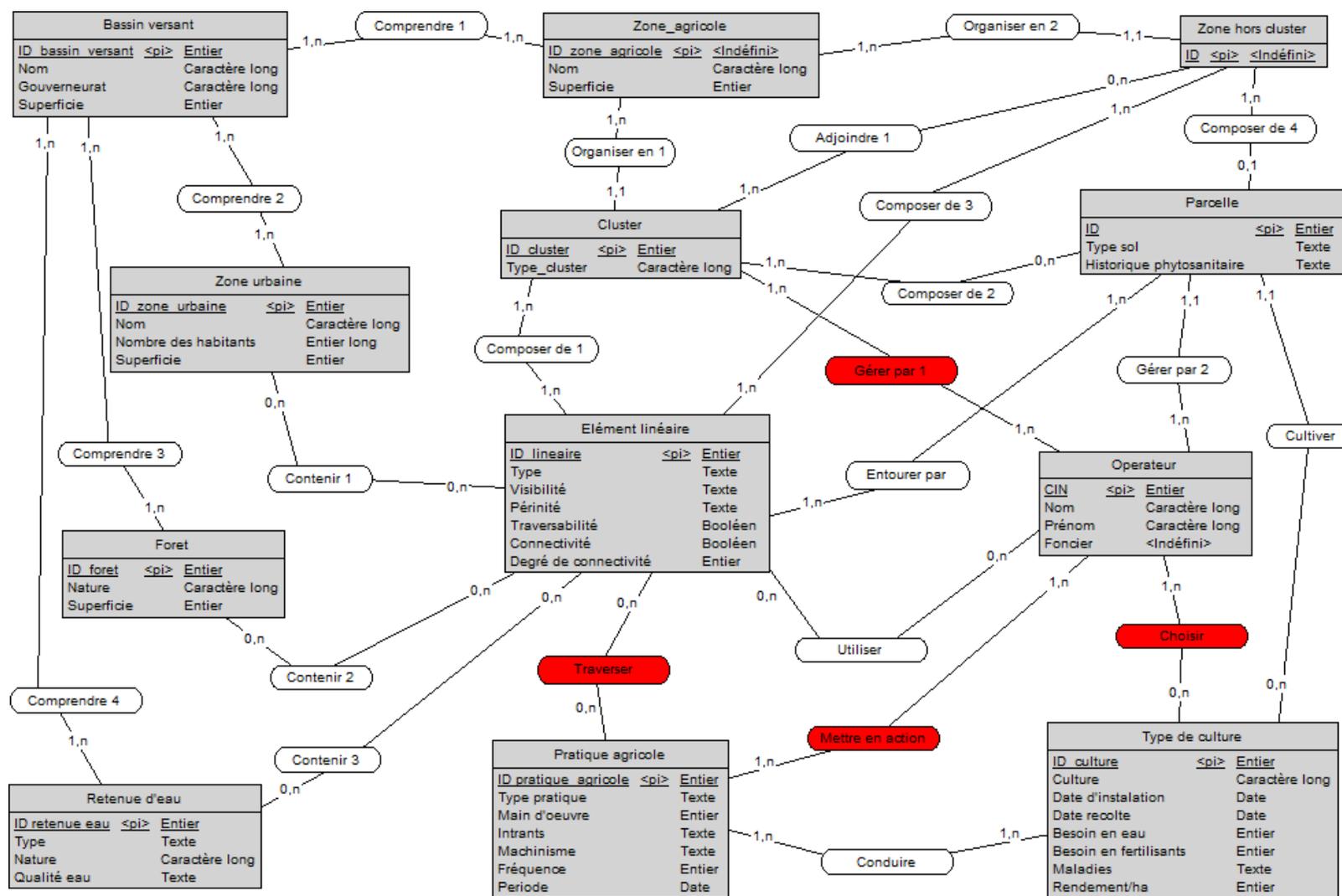


Figure 9 : Le schéma conceptuel des données des éléments linéaires du bassin versant de la Lebna

VI. Échelle de numérisation

En raison de la précision nécessaire, la numérisation a été effectuée à l'aide de QGIS 3.28.3, avec une échelle de visualisation oscillant entre 1:200 et 1:950. Cela a permis d'obtenir un niveau de détail approprié pour capturer avec précision les caractéristiques des éléments linéaires étudiés. De plus, toutes les manipulations ont été effectuées en utilisant le système de projection EPSG:32632 - WGS 84 / UTM zone 32N, l'unité de mesure est le mètre.

VII. Les indices calculés

Pour répondre aux objectifs de cette étude, plusieurs indices de densité ont été évalués:

- éléments linéaires dans chaque zone.
- éléments linéaires par unité de surface.
- nœuds dans chaque zone.
- nœuds par unité de surface.

L'unité de surface utilisée est un hexagone d'environ 0,49 ha (soit environ 0,5 ha), correspondant à la superficie moyenne d'une parcelle dans le bassin versant du Lebna, comme mentionné par Biarnés et *al.* (2021). Ce choix d'une forme hexagonale vise à neutraliser l'impact de la direction des éléments linéaires lors du calcul des indices et de conserver la variabilité spatiale maximale (Levasseur et *al.*, 2014).

VIII. Données satellitaires

1. Les images Pléiades

Les données satellitaires utilisées pour la détection des éléments linéaires dans cette étude proviennent des images Pléiades (2 février 2022 et 16 juillet 2023) capturées par les satellites Pléiades, qui sont exploités en partenariat entre l'Agence Spatiale Française (CNES) et Airbus Defence and Space Intelligence. Ces satellites produisent des images avec une résolution de 70 cm au nadir pour le mode spectral monochromatique (en noir et blanc) et de 2,8 m au nadir pour le mode multispectral (en couleur). Afin de garantir la stabilité et la fiabilité lors du traitement informatique ultérieur, ces images sont rééchantillonnées au sol pour atteindre une résolution de 50 cm. Les produits Pléiades distribués par Airbus DS sont finalement proposés avec une résolution de 50 cm en mode monochromatique et de 2 m en mode multispectral (DINAMIS ,2022). Ces données sont acquises simultanément sous forme

de bundle, bien qu'elles soient livrées séparément sans fusion préalable. Les images Pléiades sont divisées en cinq bandes spectrales (Figure 10) :

- Le monochromatique (PA) couvrant la plage de 470 à 830 nm.
- Le bleu (B0) de 430 à 550 nm.,
- Le vert (B1) de 500 à 620 nm.
- Le rouge (B2) de 590 à 710 nm.
- Le proche infrarouge (B3) de 740 à 940 nm.

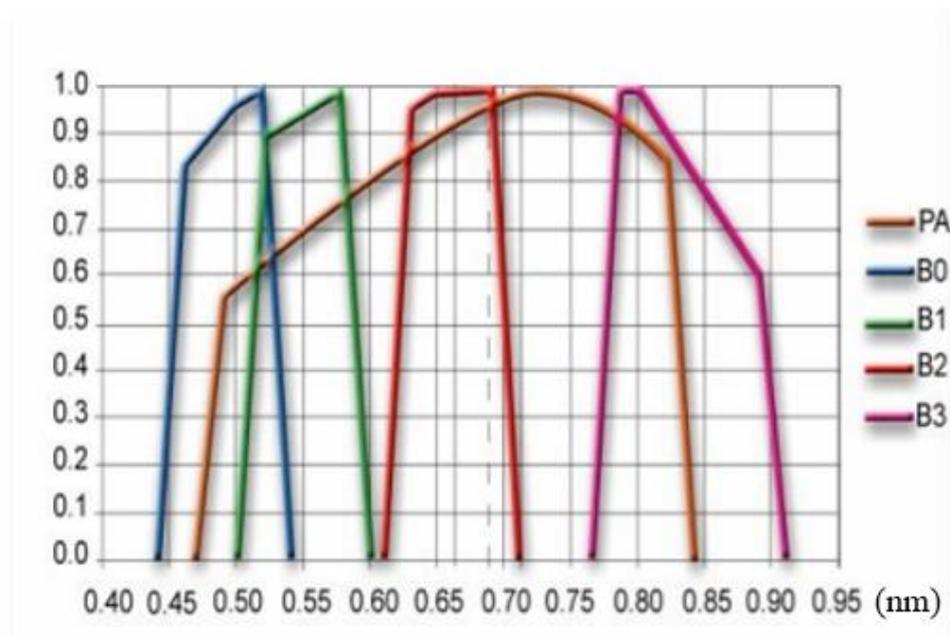


Figure 10 : Les bandes spectrales des images Pléiades (DINAMIS, 2022).

2. Les étapes de prétraitement des images satellitaires

Dans le contexte des campagnes sur le terrain, les images acquises en février 2022 ont été sélectionnées. En dehors du processus de pansharpening, qui a été appliqué pour améliorer la résolution spatiale des images multispectrales, aucun autre prétraitement n'a été appliqué à ces images.

Cependant, pour les images satellites acquises en juillet 2023, deux prétraitements distincts ont été réalisés. Le premier prétraitement consiste à un géoréférencement. Le second traitement, consistant en l'application d'un filtre Gaussien. Ce filtre a été employé dans le but d'améliorer le contraste de l'image, ce qui favorise la détection des linéaires présents dans la bande monochromatique.

Le filtre gaussien, souvent utilisé en traitement d'image, opère en lissant les variations abruptes de luminosité, ce qui peut aider à accentuer les détails et les contours. Dans ce cas précis, son application visait à optimiser la visibilité et la distinction des linéaires présents dans la bande monochromatique des images acquises en juillet 2023.

Le choix spécifique du filtre gaussien a été dicté par sa capacité à améliorer le contraste sans introduire d'artefacts indésirables dans l'image. Cette méthode est couramment employée pour améliorer la qualité visuelle des données, facilitant ainsi l'identification et l'analyse précise des caractéristiques importantes pour les études de terrain (Zhang et *al.*, 2023).

IX. Méthode de télédétection des éléments linéaires

1. Aperçu générale

Les segments de ligne apparaissent généralement dans les régions de l'image où il existe une tendance et une variance significative dans les caractéristiques de l'image, comme le montre la figure 11. Ils sont utilisés dans plusieurs tâches de vision et ne sont pas limités à des objets ou scénarios spécifiques. Les segments de ligne peuvent être représentés par leurs extrémités ou par une combinaison de leurs points médians, de leurs rayons et de leurs angles (Lin et *al.*, 2023)



Figure 11 : Caractéristiques locales d'une image test : (a) image test (b) image avec segments de ligne LSD (Lin et *al.*, 2023)

Plusieurs algorithmes de détection et de description des segments de ligne ont été proposés. Selon leur mécanisme, les méthodes de détection de segments de ligne existantes peuvent être classées en quatre catégories :

- a. Les méthodes globales basées sur la méthode de Hough exploitent la dualité entre les points et les courbes dans l'espace image et l'espace de Hough pour détecter les segments de ligne, dans lesquelles le problème de détection des segments de ligne dans l'espace image est transformé en un problème de statistiques de crête dans l'espace de Hough (Lin et *al.*, 2023).
- b. Les méthodes basées sur l'apprentissage avec les sous-catégories de détection de segments de ligne et d'images filaires (avec plus d'un segment de ligne et la jonction correspondante) apprennent les modèles de segments de ligne ou d'images filaires en concevant des réseaux et des fonctions de perte dans des ensembles de données d'apprentissage et de test soigneusement préparés (Lin et *al.*, 2023).
- c. Les méthodes hybrides intègrent plusieurs mécanismes pour détecter les segments de ligne d'une image. L'idée fondamentale de ces approches est d'amalgamer les forces de plusieurs mécanismes pour surmonter les inconvénients d'un mécanisme spécifique. Ces approches offrent un degré élevé de flexibilité pour la personnalisation (Lin et *al.*, 2023).

Les méthodes locales, avec les sous-catégories des approches basées sur le regroupement des gradients et sur l'ajustement aux contours, exploitent les caractéristiques cohérentes de l'image dans les régions locales pour détecter les segments de ligne, suivies par des processus de fusion et de validation afin d'améliorer la qualité des segments de ligne. Les méthodes basées sur le regroupement des gradients, regroupent les régions d'images présentant des orientations ou des amplitudes de gradient très cohérentes pour détecter les segments de ligne. Les méthodes basées sur l'ajustement des bords détectent les segments de ligne en ajustant des points de bord très cohérents (Gioi et *al.*, 2012 ; Lin et *al.*, 2023 ; Zhang et *al.*, 2023).

Les approches locales exploitent les caractéristiques cohérentes de l'image dans les régions locales pour détecter les segments de ligne. En fonction de la sélection des caractéristiques de l'image, elles peuvent être classées en approches basées sur le regroupement des gradients et sur l'ajustement des arêtes, qui utilisent respectivement les gradients et les arêtes de l'image. Dans cette étude, l'approche basée sur le regroupement de gradients a été testée (Lin et *al.*, 2023 ; Zhang et *al.*, 2023).

2. La méthode de la détection des segments de ligne (LSD)

La méthode de base pour la détection des segments de ligne est la méthode LSD. Son mécanisme est simple (Figure 12) : l'amplitude et la direction du gradient sont calculées, et les pixels ayant une forte probabilité d'être traversés par des segments de ligne sont extraits en tant que points d'ancrage efficaces. Ensuite, les ancres sont activement regroupées en segments de ligne sur la base de la géométrie des segments de ligne et de l'alignement de la direction du gradient. Les paramètres du segment de ligne sont calculés sur la base du rectangle approximatif s'il est valide (Grompone von Gioi et al, 2012; Lin et al, 2023).

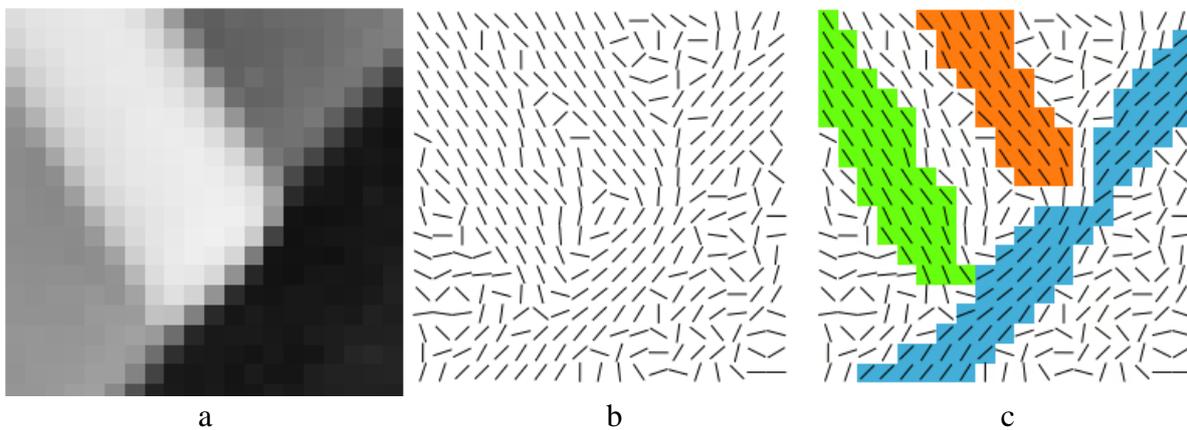


Figure 12 : Illustrations visuelles de l'algorithme LSD : (a) région d'intérêt de l'image ; (b) lignes de niveau (petites lignes noires) et rectangles approximatifs pour les ROS de ligne, (c) les segments de ligne sont détectés à partir de ces rectangles approximatifs (Gioi et al., 2012).

3. Critères d'évaluation

Pour évaluer de manière scientifique et complète les performances du LSD, le présent document utilise trois indicateurs classiques dans le domaine de la détection de segments de ligne : la précision, le rappel et le score F. Ces indicateurs peuvent être calculés de la manière suivante :

$$\text{Précision } P = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$\text{Rappel } R = \frac{TP}{TP+FN}$$

$$\text{Score F} = \frac{2PR}{P+R}$$

Où TP représente le nombre de segments de ligne détectés avec précision, appelés vrais positifs, FP reflète le nombre de segments de ligne détectés à tort, également appelés faux positifs, et FN représente les faux négatifs, c'est-à-dire le nombre de segments de ligne présents dans l'image que l'algorithme n'a pas réussi à détecter (Zhang et *al.*, 2023).

4. Logiciels utilisés pour appliquer la méthode LSD

Dans le cadre de cette étude, le logiciel R, version 4.3.1, a été employé pour implémenter l'algorithme LSD et extraire le shapefile résultant. Afin de valider ce modèle d'extraction des éléments linéaires, les données collectées sur terrain ont été utilisées comme références de réalité terrain pour la partie télédétection. L'analyse a été effectuée à l'aide du logiciel QGIS 3.38.5 pour examiner et confronter les résultats obtenus avec ceux des données collectées.

Chapitre III : Résultats et discussion

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'analyse des éléments linéaires dans les zones d'échantillonnage à Lebna, ainsi que la modélisation de ces derniers et les méthodes employées pour détecter les segments de lignes. Nous examinerons ensuite ces résultats à la lumière des travaux scientifiques existants, ouvrant ainsi la voie à une discussion approfondie.

I. Analyse de la diversité des types d'éléments linéaires dans différentes zones d'échantillonnage sur le terrain

Une carte illustrant les éléments linéaires recueillis sur le terrain dans toutes les zones d'échantillonnage (Figure 13) offre une vision d'ensemble et géographiquement exhaustive de ces éléments.

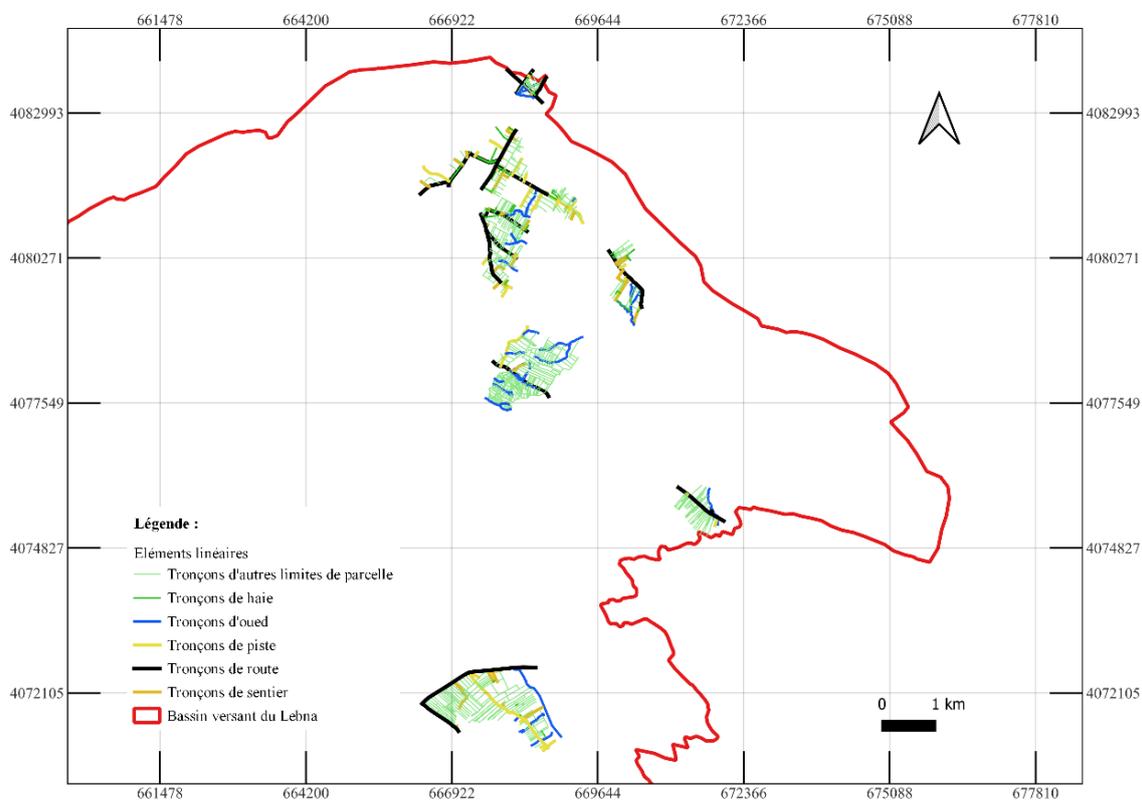


Figure 13 : Carte de la typologie et la distribution des éléments linéaires dans les zones de l'échantillonnage élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

Une analyse statistique descriptive des éléments linéaires (Tableau 3) montre des caractéristiques remarquables qui aident à reconnaître la nature de ces éléments et leurs disparités dans et hors les clusters.

L'ensemble des données comprend 1022 éléments linéaires qui sont classés en deux groupes distincts : 605 éléments regroupés dans les clusters et 417 éléments qui ne le sont pas. Ces résultats indiquent une disparité significative dans la distribution des éléments linéaires échantillonnés, bien que les régions aient une surface couverte similaire.

Les composantes linéaires affichent une moyenne d'environ 171 m, avec des valeurs très proches pour les éléments à l'intérieur et à l'extérieur des clusters, soit respectivement 172 m et 169 m. Néanmoins, les écarts types associés sont significatifs, s'élevant à 172 m, 161 m et 187 m respectivement. De plus, les médianes de toutes les composantes se situent autour de 123 m, avec des valeurs d'environ 122 m pour les éléments à l'intérieur des clusters et 125 m pour ceux à l'extérieur. Les valeurs moyennes ne sont pas représentatives en raison d'écarts types aussi élevés voire supérieurs à la moyenne. En examinant la distribution des tailles selon la loi normale dans l'histogramme (Annexe 2), on observe une asymétrie sur la gauche, ce qui pourrait indiquer une prévalence de tronçons de petite taille.

Les mesures de dispersion ont été utilisées pour examiner la répartition des données. Les valeurs minimales et maximales demeurent constantes pour tous les éléments linéaires, variant de 6 m à 1636 m. Toutefois, une différence est relevée pour les éléments regroupés en clusters, avec une valeur maximale légèrement inférieure, atteignant 1045 m. Les mesures d'écart-type et de variance indiquent un niveau de dispersion légèrement plus élevé à l'intérieur des clusters qu'à l'extérieur de ces derniers.

Cette analyse permet de saisir les caractéristiques numériques des éléments linéaires. Elle révèle des tendances centrales similaires mais une dispersion légèrement plus accentuée entre les deux zones (à l'intérieur et à l'extérieur des clusters).

Tableau 3 : Analyse statistique des dimensions des éléments linéaires dans les zones de l'échantillonnages

	Nombre	Longueur moyenne (m)	Longueur médiane (m)	Longueur min (m)	Longueur max (m)	Ecart type (m)
Eléments linéaires totaux	1022	171	123	6	1637	172
Eléments linéaires dans les clusters	605	172	122	6	1046	25716
Eléments linéaires hors les clusters	417	170	125	9	1637	187

1. Analyse quantitative de la distribution des éléments linéaires à Lebna par descripteur

La répartition quantitative des descripteurs des éléments linéaires recueillis sur le terrain au sein du bassin versant du Lebna est représenté sous forme de diagramme (Figure 14). Cette représentation graphique donne un aperçu global des caractéristiques et des propriétés de ces éléments.

Les résultats présentent une étude détaillée des qualités inhérentes aux éléments linéaires étudiés au sein du bassin versant du Lebna, révélant leur variabilité, leur disposition spatiale et leurs caractéristiques distinctives. En termes quantitatifs, cette analyse met en évidence la prédominance des tronçons d'autres limites de parcelles en tant que catégorie majeure d'éléments linéaires, en particulier ceux qui sont intégrés dans des clusters.

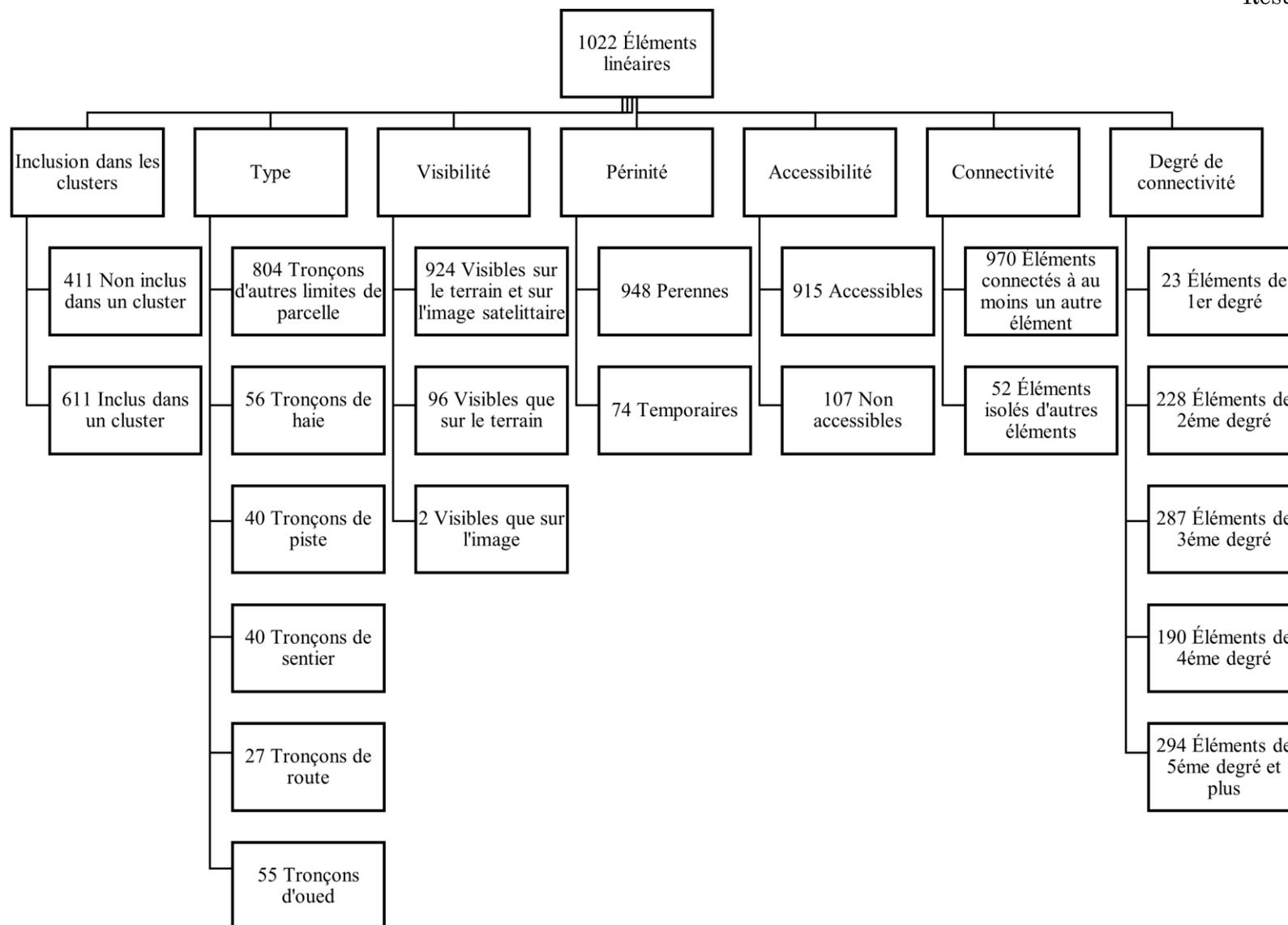


Figure 14 : Diagramme de la typologie des éléments linéaires prélevé sur le terrain dans le Lebna selon les critères de description thématique.

II. Analyse de longueur par type de tronçon d'éléments linéaires

L'analyse statistique des différents types de segments recueillis sur le terrain met en évidence des caractéristiques uniques dans leurs longueurs et leurs variations (Tableau 4). D'une part, les tronçons de route, de piste et de sentiers présentent une longueur moyenne de 593 m, 227 m et 157 m respectivement avec une variation importante, ce qui démontre un niveau élevé de variabilité dans ces segments. D'autre part, les tronçons d'oueds présentent un degré de variabilité plus élevé, avec une longueur moyenne de 271 m et une fourchette de 20 à 1 637 m. Les tronçons de haie ont une longueur moyenne de 129 mètres et une variation modérée de 23 à 674 m. Enfin, les autres tronçons de limite de parcelles ont une longueur moyenne de 151 m, avec des valeurs allant de 7 à 771 m, reflétant une variabilité similaire à celle des autres catégories de limites.

Ces résultats révèlent des différences notables dans la longueur et la dispersion entre les différents types d'élément linéaire, ce qui contribue à approfondir notre compréhension des caractéristiques linéaires observées sur le terrain. Cependant, cette analyse longitudinale suggère que malgré la diversité des types d'éléments linéaires, leur longueur présente une grande variabilité. Par ailleurs, il semble que la longueur des éléments linéaires seule ne joue pas un rôle déterminant dans l'organisation en clusters des parcelles agricoles.

Tableau 4 : Distribution des longueurs par type de tronçon d'éléments linéaires.

Type	Longueur (m)					
	Moyenne	Ecart type	Variance	Maximum	Minimum	Médiane
Route	593	337	113387	1252	41	530
Piste	227	294	86247	1446	9	124
Sentier	157	123	15067	533	24	118
Oued	271	260	67721	1637	20	204
Haie	129	120	14452	674	23	91
Autres limites de parcelle	151	126	15848	771	7	119

III. Indices d'analyse spatiale des éléments linéaires

1.1. Analyse de densité des éléments linéaires par zone géographique

L'analyse de l'indice de densité d'éléments linéaires dans les différentes régions géographiques révèle des tendances claires dans leur distribution spatiale (Tableau 5).

La zone 1 présente une densité moyenne de 68 éléments linéaires/km². Il existe une disparité notable dans la densité des éléments à l'intérieur et à l'extérieur des clusters (103 éléments/km² et 56 éléments/km², respectivement), ce qui indique une organisation spatiale.

La zone 2 est particulièrement remarquable pour sa densité globale plus élevée (127 éléments linéaires/km²), et il y a une concentration marquée d'éléments à l'intérieur des zones de regroupement (211 éléments/km²) par rapport à l'extérieur (82 éléments/km²).

L'analyse de la zone 3 révèle une densité exceptionnellement élevée d'éléments linéaires. Cette densité est largement attribuée à la présence exclusive de clusters, comme en témoigne la densité spécifique dans ces zones, qui s'élève à 1532 éléments/km², une valeur considérablement supérieure à la moyenne de la zone. Une observation intrigante est la présence d'une densité significative, bien que moindre, hors des clusters, atteignant 31 éléments/km². Cette découverte contraste avec l'idée antérieure selon laquelle la zone 3 ne contenait que des clusters. Cette donnée soulève des questions quant à la distinction précise entre les zones de cluster et les zones non-clusterisées. Il est pertinent de noter qu'au moment de la collecte des données sur le terrain, aucune barrière ou signe distinctif n'a été identifié pour délimiter explicitement les zones de cluster des autres parties environnantes.

La zone 4 a une densité de 35 éléments linéaires/km², avec une densité plus élevée en dehors des clusters (52 éléments/km²) qu'à l'intérieur des clusters (24 éléments/km²).

La zone 5 présente une densité modérée de 66 éléments linéaires par kilomètre carré, mais un écart évident entre la densité à l'intérieur des clusters (175 éléments/km²) et celle à l'extérieur des clusters (41 éléments/km²), ce qui indique une concentration importante à l'intérieur des clusters.

Enfin, la zone 6 se distingue par l'absence totale de clusters, avec une densité constante de 110 éléments linéaires par kilomètre carré, en dehors de toute cluster.

Ces résultats soulignent l'importance de ne pas se contenter d'examiner les densités générales par zone, mais de prendre également en compte les dissemblances entre les densités à l'intérieur et à l'extérieur des clusters. L'absence de marqueurs physiques pour délimiter les

zones de clusters dans certains cas, comme dans la zone 3, suscite des incertitudes quant à l'importance des éléments linéaires dans la délimitation des clusters dans la zone étudiée.

Tableau 5 : Analyse Spatiale des Densités Linéaires.

Densité par Km ²	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Totale	68	127	450	35	66	110
Intérieur du cluster	103	211	1532	24	175	0
Hors cluster	56	82	31	52	41	110

2. Analyse de densité par unité de surface

L'analyse de l'indice de densité des éléments linéaires par unité de surface révèle l'existence de 12 classes de densité avec des indices allant de 0 à 13 éléments linéaires par unité de surface dans les zones d'études (Figure 15).

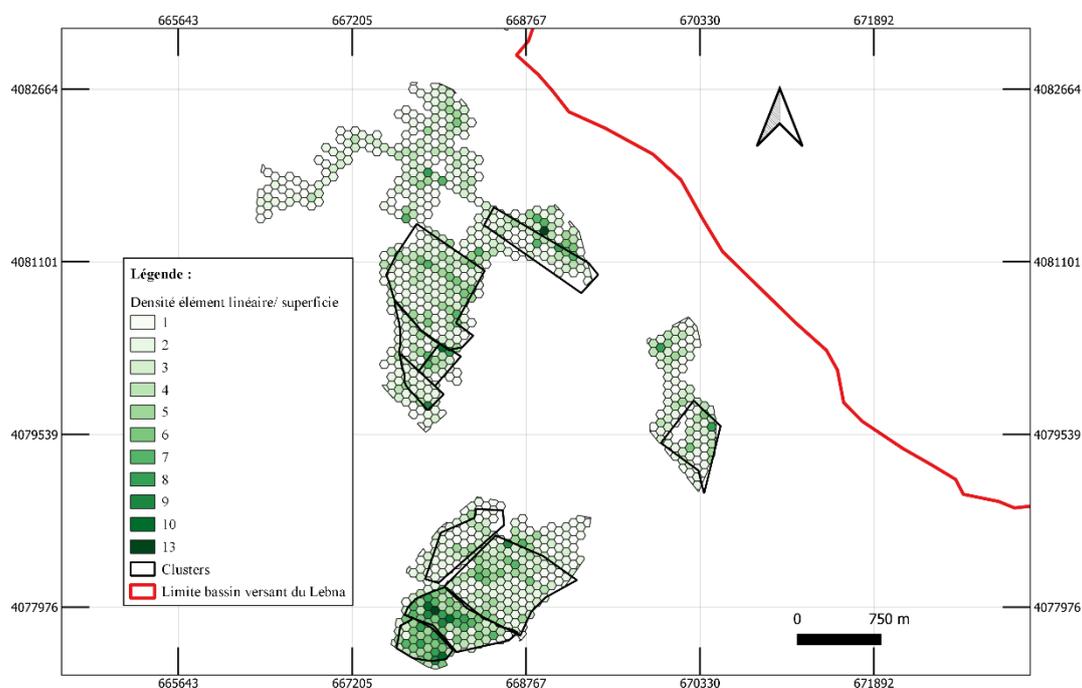


Figure 15 : Carte de la distribution de la densité d'éléments linéaires par unité de surface dans les zones de l'échantillonnage au Lebna : Exemple la zone 3, 4 et 5. Carte élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

L'analyse de l'évolution de l'indice de densité des éléments linéaires par unité de surface en fonction du nombre d'unités globales (Figure 16) révèle une corrélation inverse entre l'augmentation de la densité des éléments linéaires et la diminution du nombre d'unités globales.

Il est notable que la densité 0 prédomine avec 1080 occurrences, signalant des zones étendues où les éléments linéaires sont absents, notamment au sein des parcelles agricoles. Une diminution progressive des occurrences est observée de la densité 1 à la densité 10, suggérant une répartition inégale des éléments linéaires dans les zones étudiées, avec une concentration plus marquée dans les densités inférieures.

Par ailleurs, la rareté de la densité maximale, notée à 13 avec seulement 2 occurrences, suscite l'intérêt en raison de son caractère inhabituel, incitant à approfondir son impact sur la distribution globale des éléments linéaires. Cette observation invite à une exploration approfondie pour comprendre les raisons sous-jacentes à cette densité particulière et son influence potentielle sur la répartition générale des éléments linéaires dans l'étude.

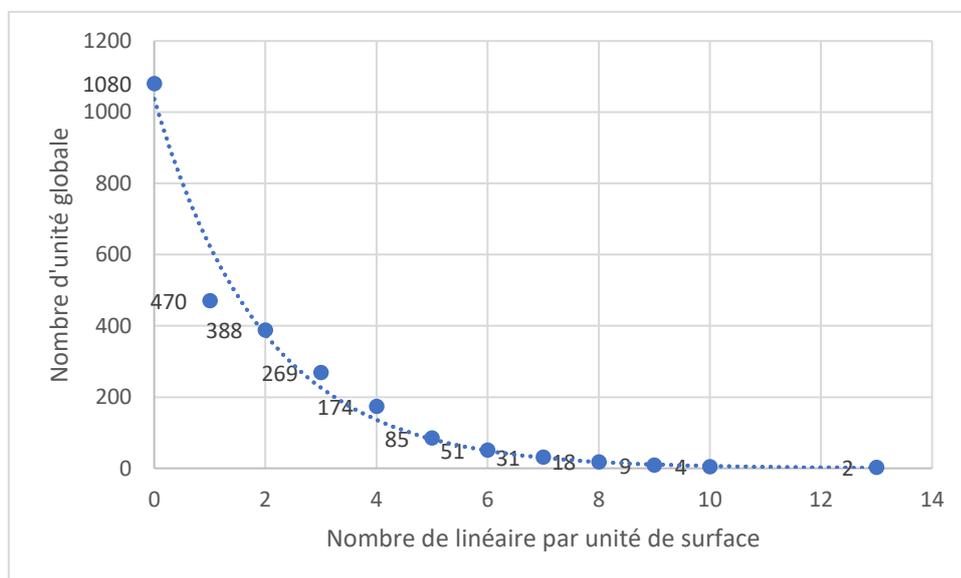


Figure 16 : Courbe d'évolution l'indice de densité d'éléments linéaires par unité de surface selon le nombre d'unité globale.

3. Analyse des densités de nœuds par zone géographique

L'étude de l'indice de densité des nœuds révèle des différences notables concernant la concentration des nœuds dans chaque zone (Tableau 6). La zone 1, comprenant 512 nœuds, présente une densité totale élevée de 195 nœuds/ha, avec une densité encore plus marquée au sein des clusters, atteignant 315 nœuds/ha.

En comparaison, la zone 2 abritant 210 nœuds affiche une densité relativement élevée de 372 nœuds par ha, avec une densité hors clusters se situant à 487 nœuds/ha. En contraste, la zone 5 avec 1020 nœuds présente une densité totale plus modérée de 183 nœuds/ha, bien que la densité dans les clusters y soit notablement plus élevée, à 422 nœuds/ha.

La zone 3, comptant 212 nœuds, offre une densité modérée de 312 nœuds/ha, avec une densité dans les clusters atteignant 444 nœuds/ha. Notamment, la zone 4 se distingue par la présence de 984 nœuds, générant une densité élevée de 541 nœuds/ha, principalement due à une densité accrue dans les clusters, s'élevant à 747 nœuds/ha (Figure 17).

Enfin, la zone 6, constituée principalement d'un seul cluster avec 94 nœuds, révèle une densité totale élevée de 324 nœuds/ha. Cette analyse globale démontre que les clusters présentent une densité de nœuds significativement plus élevée que les zones sans clusters.

Tableau 6 : Densité des nœuds par zone d'analyse et répartition en clusters

Zone	Nombre des nœuds			Densité des nœuds (nœud/km ²)		
	Nombre de nœuds par zone	Nombres des nœuds hors clusters	Nombres des nœuds des clusters	Densité par zone	Densité hors cluster	Densité dans les clusters
1	512	296	216	195	153	315
2	210	183	27	372	487	143
3	212	126	86	312	259	444
4	984	142	842	541	205	747
5	1020	568	452	183	126	422
6	94	94	0	324	324	0
Totale	3032	1409	1623			

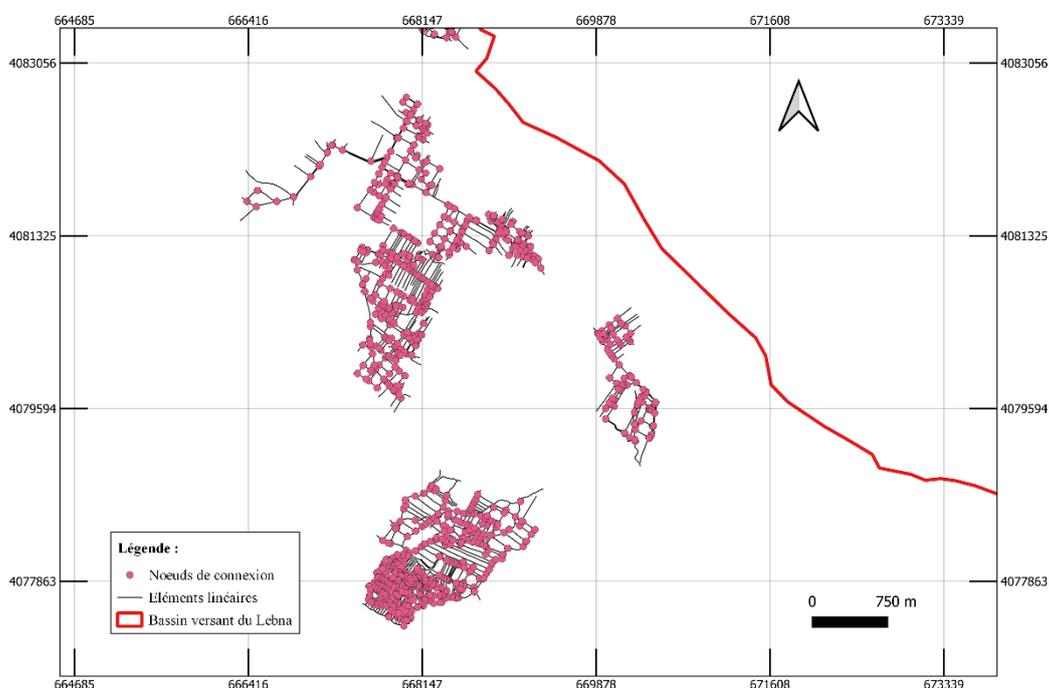


Figure 17 : Carte de la répartition des nœuds de connexion des éléments linaires dans les zones de l'échantillonnage : Exemple la zone 3, 4 et 5, élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

4. Analyse de densité des nœuds par unité de surface

L'indice de densité par nœud varie de manière inégale par unité dans l'échantillon analysé, avec des différences notables entre les différentes zones d'analyse. La plupart des unités (1951 occurrences) ne présentent aucun nœud, représentant ainsi une part significative de l'échantillon. Ce qui est remarquable, c'est qu'une unité de 0,5 hectare peut contenir 18, 22 ou 24 nœuds (Tableau 7).

Tableau 7 : Répartition de l'indice de densité de nœuds par unité d de surface dans les zones de l'échantillonnage.

Indice de densité de nœud	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	22	24
Nombre d'unité dans les clusters	577	134	75	48	22	16	13	10	0	4	1	1
Nombre d'unité hors les clusters	1753	175	71	49	19	11	5	6	3	0	1	0
Nombre d'unité globale	1951	282	131	97	41	31	19	17	4	4	2	2

De plus, les unités présentes dans les clusters de celles en dehors, révèlent des nuances significatives. Les unités localisées dans les clusters présentent une densité de nœuds plus élevée par rapport à celles situées en dehors, même si la différence peut être légère dans certains cas. En effet, il est évident que les clusters affichent généralement une densité de nœuds supérieure à celle observée en dehors de ces regroupements.

Cette disparité dans la densité des nœuds entre les zones de cluster et les zones hors cluster est également visuellement identifiable dans les cartes illustrant la densité des nœuds (Figure 18). Ces cartes offrent une représentation graphique de la répartition spatiale des nœuds, mettant en évidence les zones où les clusters présentent une concentration plus élevée de nœuds par rapport aux zones hors cluster.

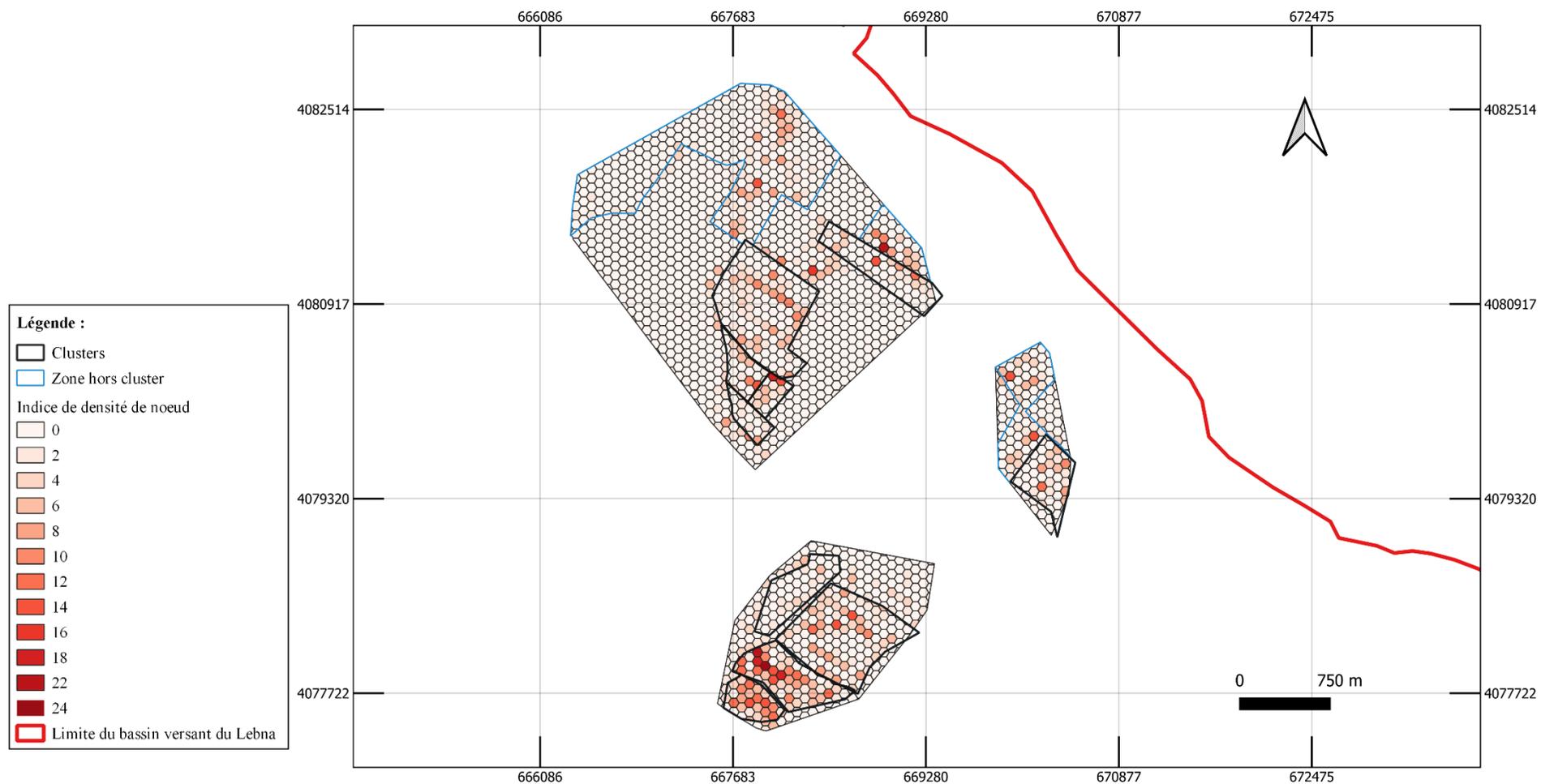


Figure 18 : Carte de la répartition de la densité des nœuds par unité de surface : exemple zones 3, 4 et 5. Carte élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

IV. Analyse des éléments dans le contour des clusters

Pour examiner l'hypothèse concernant l'isolement géographique des parcelles organisées en clusters, l'analyse s'est focalisée sur les 188 tronçons d'éléments linéaires entourant ces regroupements (Figure 19).



Figure 19 : Cartes d'éléments linéaires au bord des limites des clusters exemple de la zone 3 élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

L'analyse de ces éléments linéaires de contour de clusters (Figure 20) a considéré deux catégories principales : les éléments pérennes et temporaires.

Les éléments pérennes (183 occurrences) sont tous visibles à la fois sur le terrain et sur les images. Les éléments temporaires (5 occurrences) incluent ceux qui étaient visibles sur le terrain uniquement. L'observation de ces éléments montre qu'ils croisent les contours des clusters sans en faire intrinsèquement partie, les qualifiant ainsi d'artéfacts (Figure 21).

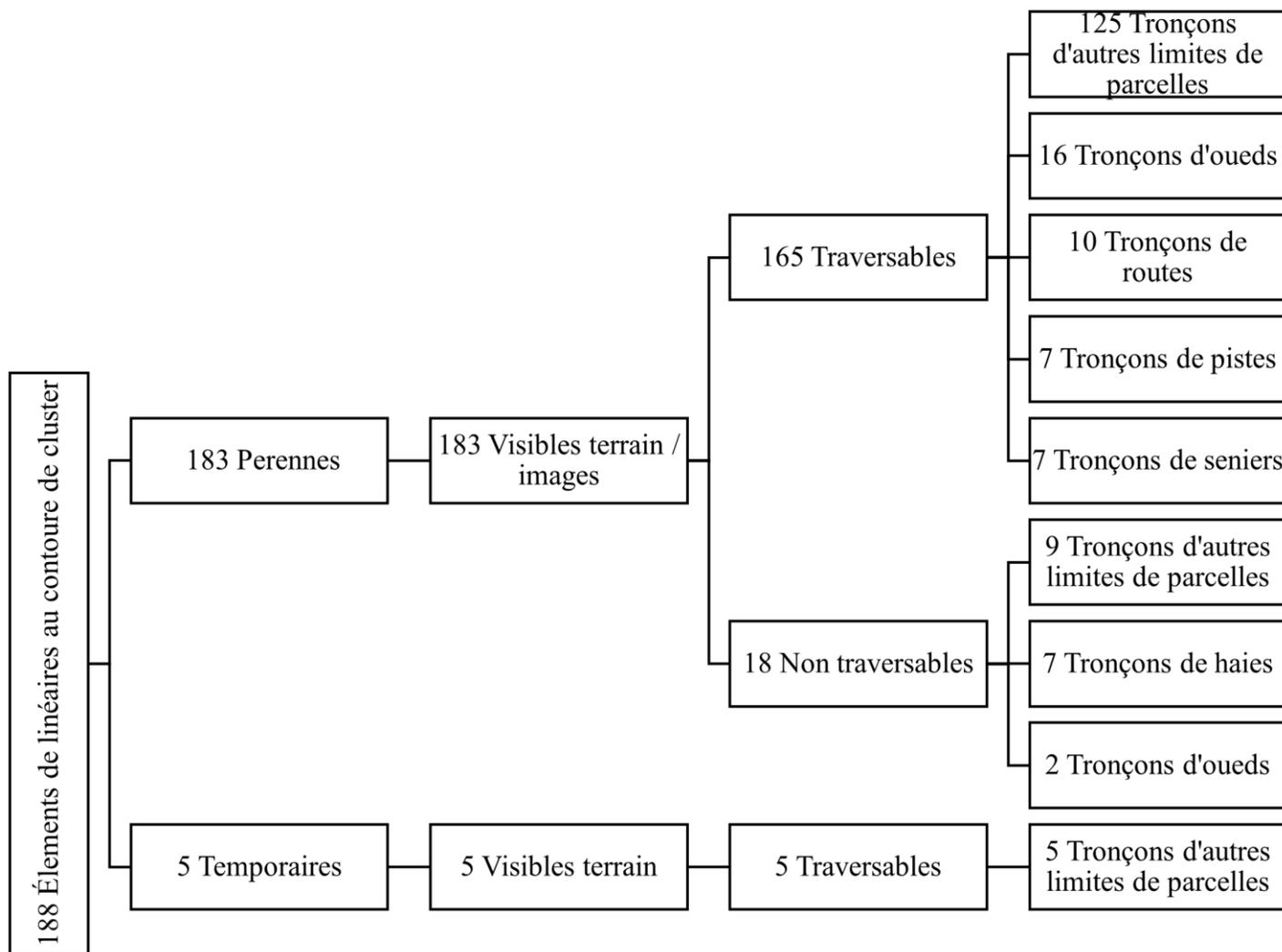


Figure 20 : Diagramme de la typologie des éléments linéaires de contour des clusters au Lebna.

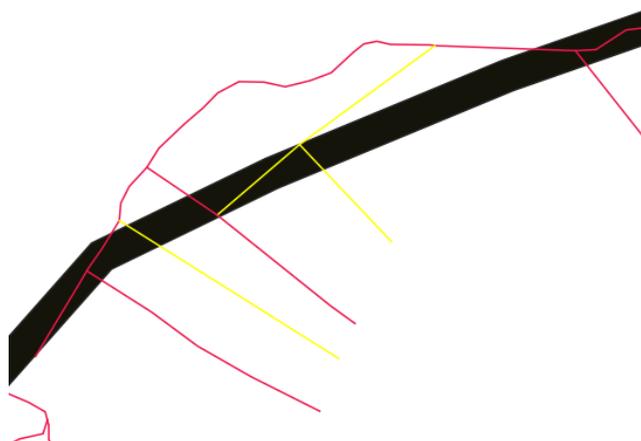


Figure 21 : Exemple d'éléments linéaires en jaune, classés comme un élément de contour de cluster, mais c'est un artefact.

Cette analyse détaillée met en évidence la prédominance des éléments pérennes par rapport aux temporaires, avec une grande majorité de ces éléments pérennes étant visibles à la fois sur le terrain et sur les images. La diversité des types d'éléments traversables souligne une variété significative dans les caractéristiques des contours de clusters, avec une prédominance des tronçons liés aux limites de parcelles qui sont traversables. Il est aussi intéressant de noter que cette analyse indique que les zones d'agrégats de champs ne sont pas isolées géographiquement des autres parcelles.

V. Extraction des linéaires par la méthode détection du segment de ligne

La carte des segments extraits par l'algorithme LSD dans la zone 6 (Figure 22) montre principalement de courts segments de ligne. Ces résultats sont confirmés par l'évaluation de performance de LSD (Tableau 8), où seuls 32 éléments linéaires sont présents dans cette zone en tant que références, mais l'algorithme en détecte 154 comme vrais positifs et 285 comme faux positifs (Figure 23). Cependant, ces segments ne représentent pas pleinement la réalité du terrain, ce qui se traduit par une faible précision ($P=0.35 < 1$) et un F-score moyen. Cette analyse souligne la sélectivité de l'algorithme dans la détection des éléments linéaires, montrant un écart entre les segments identifiés et la totalité des éléments linéaires réels. En conséquence, l'efficacité de cet algorithme pour détecter ces éléments est remise en question.

Tableau 8 : Critères d'évaluation de la performance de l'algorithme LSD.

Critère	Témoin	Vrai positif	Faux positif	Faux négatif	Précision	Rappel	F-score
Grandeur	32	154	285	9	0.35	0.94	0.51

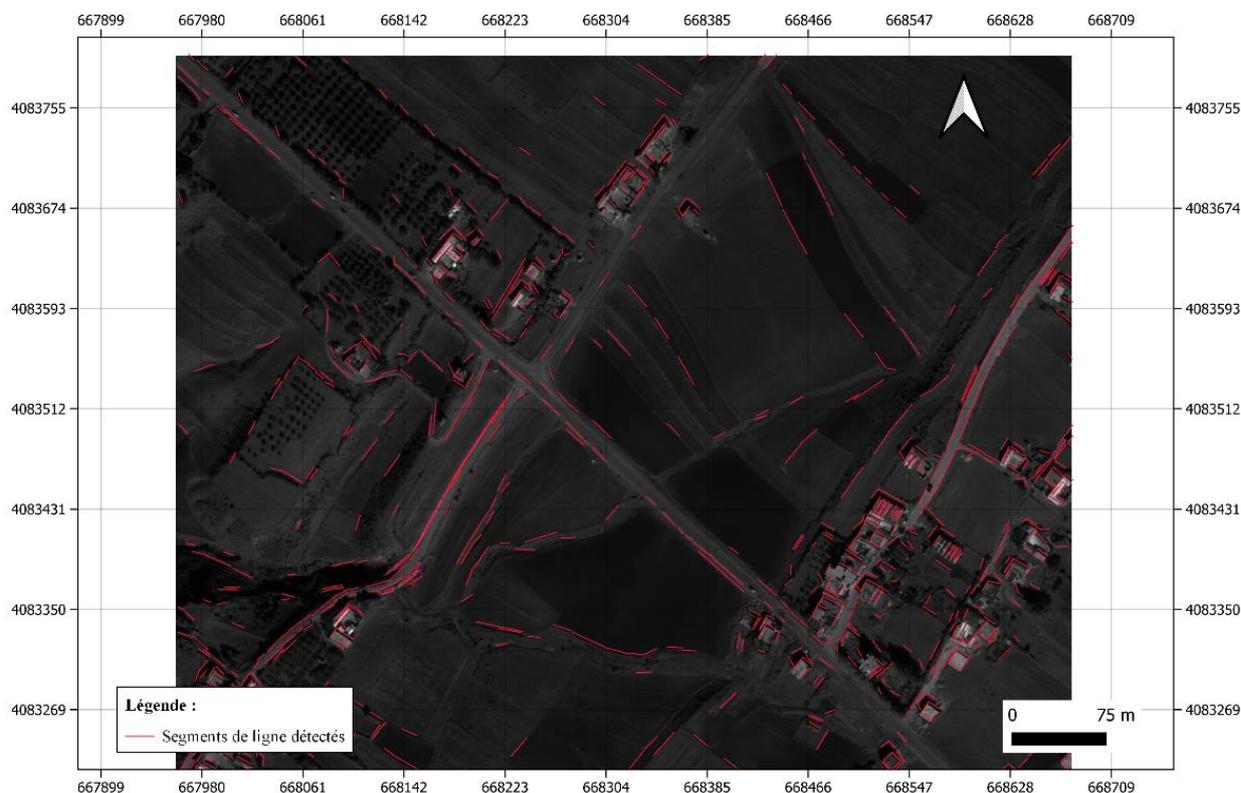


Figure 22 : Carte des segments de lignes extrait par l'algorithme LSD de la zone 6, sur une image Pléiades monochromatique acquise le 16 juillet 2023, élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

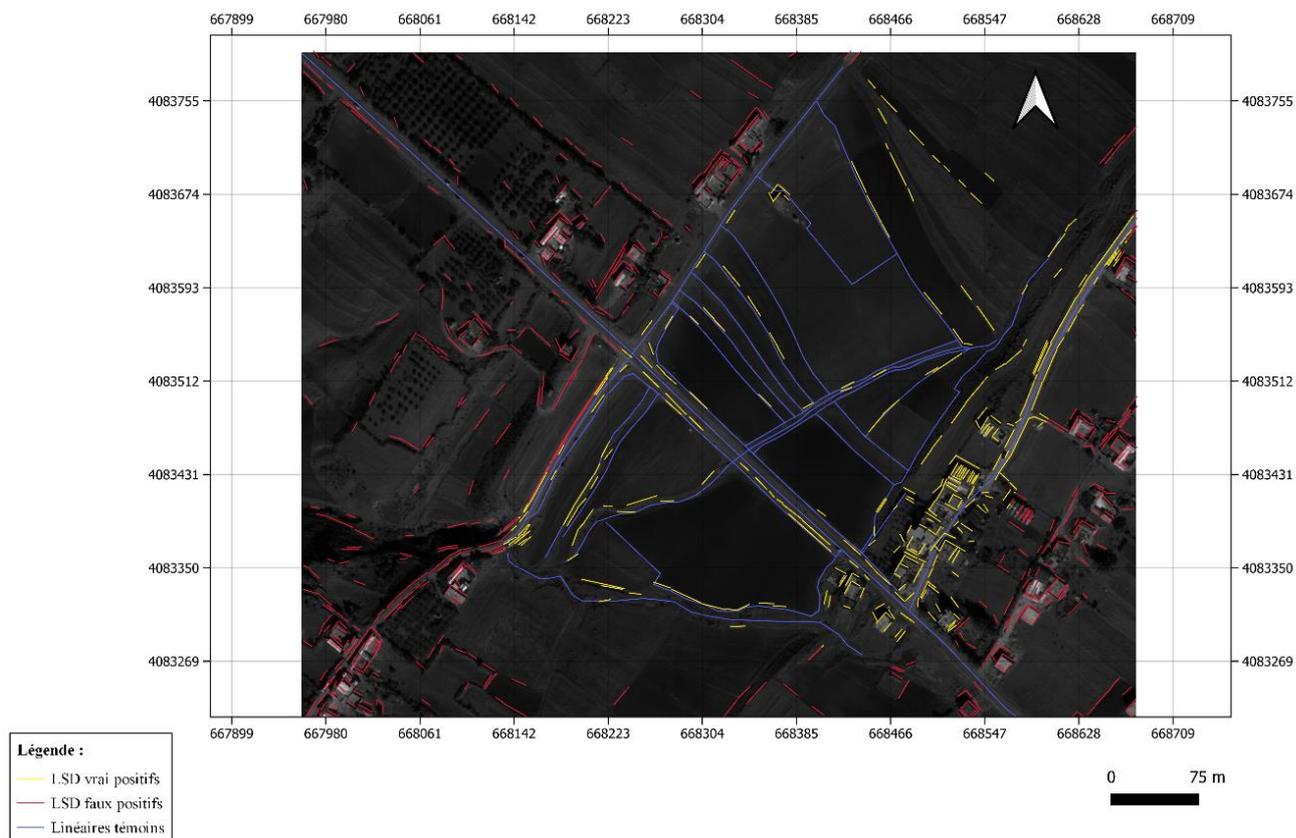


Figure 23 : Carte des segments de lignes extraits par l'algorithme LSD dans la zone 6, sur une image Pléiades monochrome acquise le 16 juillet 2023, élaborée dans le système de projection EPSG : 32632 - WGS 84 / UTM zone 32N.

VI. Discussion

En termes de démarche globale, les résultats de cette étude ont révélé une corrélation entre les observations sur le terrain et les données collectées à partir d'images satellites. Sur les 1022 éléments étudiés, 925 ont été détectés, dont la grande majorité était observable à la fois sur le terrain et sur les images satellites. Cependant, 96 éléments étaient exclusivement visibles lors des observations sur le terrain, principalement sous la forme de tronçons de limites de parcelle.

Il est intéressant de noter que parmi les 1022 éléments, 949 ont été classés comme permanents, tandis que 74 ont été identifiés comme temporaires. Cette divergence entre la permanence des éléments détectés révèle des dynamiques spatiales et temporelles complexes. Par exemple, l'apparition exclusive de certains éléments sur le terrain peut être attribuée à des phénomènes tels que le développement végétatif ou des pratiques agricoles synchronisées,

comme le labour du sol ou les opérations de semis, reliant deux parcelles voisines au moment de l'acquisition des images satellites.

Les découvertes mettent en lumière la complexité des interactions entre la séquence collective des cultures et les limites de parcelles, offrant une perspective essentielle pour comprendre les dynamiques agricoles spécifiques à cette région. De plus, la gestion collective des parcelles, une caractéristique distincte de l'agriculture dans la région du cap Bon en Tunisie, notamment dans la région du Lebna, a été soulignée dans plusieurs études antérieures, telles que celle de Mekki et *al.* (2018). Cette dynamique peut être une des raisons sous-jacentes des variations spatio-temporelles observées dans les limites des parcelles entre différentes saisons agricoles.

Concernant l'accessibilité à travers les éléments linéaires, 915 ont été classés comme franchissables et 108 comme non franchissables. Parmi ceux-ci, 165 éléments sont traversables, tandis que 18 se trouvent aux contours des clusters étudiés, démontrant ainsi que ces clusters sont stratégiquement isolés des autres parcelles, mais non pas géographiquement.

L'analyse de ces éléments a révélé que 612 font partie d'un cluster, tandis que 411 n'en font pas partie. Cette classification indique une concentration remarquable d'éléments linéaires dans les régions de clusters de champs, expliquée par des indices de densité plus élevés dans les clusters par rapport aux zones d'échantillonnage et aux zones hors cluster. Par exemple, la zone 3 présente une densité exceptionnellement élevée d'éléments linéaires, atteignant 450/km², largement attribuée à la présence exclusive de clusters, avec une densité spécifique de 1532 éléments/km², bien au-dessus de la moyenne de la zone. Une observation intrigante est la présence d'une densité significative, quoique moindre, hors des clusters, atteignant 31 éléments par kilomètre carré. Cette découverte contraste avec l'idée antérieure selon laquelle la zone 3 ne contenait que des clusters. Au moment de la collecte des données sur le terrain, aucune barrière ou signe distinctif n'a été identifié pour délimiter explicitement les zones de cluster des autres parties environnantes, suggérant qu'il s'agit plutôt d'une gestion collective de parcelles entre les zones de cluster et les zones non-clusterisées.

En outre, l'étude menée par Thenail (2002) a souligné que le morcellement des territoires agricoles est une caractéristique historique de la Bretagne, où les champs étaient couramment découpés en parcelles plus petites délimitées par de nouvelles haies, pour être redistribuées aux héritiers. Dans son étude, Thenail (2002) a suggéré que l'évolution de la densité des haies ne peut pas être considérée indépendamment de l'évolution des autres structures de l'espace

agricole, telles que la configuration des champs et les lignes de communication. Ce double phénomène de fragmentation et de dispersion des territoires agricoles conduit à une mosaïque complexe constituée de morceaux de nombreux territoires agricoles. Dans le même cadre, la formalisation des réseaux sociotechniques pour les principales activités de terrain est plus forte dans le paysage de bocage ouvert, avec la participation des agriculteurs à des pools de machines coopératifs, que dans les autres zones de bocage où ils sont plus diversifiés et moins formels. De la zone de bocage dense à la zone de bocage ouvert, les exploitations laitières présentent une proportion croissante de maïs utilisé pour l'ensilage et les céréales, de prairies de courte durée et de cultures commerciales, ce qui peut être considéré comme un gradient d'intensification de l'utilisation des parcelles. Ces différences dans les systèmes d'utilisation des parcelles sont associées à des différences dans la gestion technique du territoire agricole. Dans le bocage dense, la forte fragmentation des territoires agricoles conduit les agriculteurs à baser une grande partie de la gestion des troupeaux sur des "lots de bovins circulants", mélangeant différents types de bovins, une pratique difficile à mettre en place dans ces situations de petits champs dispersés.

Un des résultats de cette étude est la définition d'une démarche de relevé terrain des éléments linéaires et des approches possibles pour leur analyse spatiale. L'étude, réalisée sur une seule saison culturale, nécessiterait d'être répliquée sur plusieurs saisons afin d'identifier les invariants dans les relations entre configuration spatiales des cultures ou de cluster de cultures et éléments linéaires. De plus, la saison de réalisation des relevés fut marquée par une sécheresse, ce qui a pu déterminer des changements tactiques inattendus dans les choix des cultures par les agriculteurs. Ces choix peuvent avoir altéré les séquences habituelles et les potentiel relation entre allocations des cultures et éléments linéaires. Des répétitions de l'étude dans le temps pourraient permettre de dépasser cette contrainte météorologique conjoncturelle de l'étude.

L'algorithme de détection de segments de ligne (LSD) a été étudié pour son utilisation dans l'extraction d'éléments linéaires via la télédétection. Cependant, ses performances ont montré des lacunes significatives dans la représentation fidèle de ces éléments. Les résultats obtenus se matérialisent souvent sous forme de fragments de lignes disjoints, ne capturant pas intégralement les entités sur le terrain. Notamment, pour des éléments linéaires présentant une certaine largeur, comme les routes et les oueds, l'algorithme a tendance à détecter leurs bordures plutôt que les éléments eux-mêmes, réduisant ainsi la précision à un seul segment de ligne.

Plusieurs études ont souligné l'inefficacité de l'algorithme LSD dans l'extraction de lignes, notant ses limitations à différentes échelles d'images. Ces constats renforcent l'idée que cet algorithme n'est pas optimal pour l'extraction d'éléments linéaires en raison de sa propension à produire des résultats fragmentés et peu représentatifs de la réalité observée sur le terrain (Zhang et *al.*, 2023).

Pour résoudre le problème de sur-segmentation, Cho et *al.* (2018) ont introduit une nouvelle technique de détection des segments de ligne (Lignelet). Bien qu'elle ait la capacité d'extraire des segments de ligne plus efficacement, elle ne parvient pas à corriger les ruptures de segments en cas d'instabilité du gradient. Concernant l'ajustement des segments de ligne, Yang et *al.* (2019) ont présenté un détecteur de segments de ligne basé sur la longueur (LB-LSD), utilisant la longueur plutôt que l'erreur conventionnelle des moindres carrés pour l'ajustement. Ensuite, Zhang et *al.* (2021) ont conçu une méthode de détection de segments de ligne (AG3 lines) fusionnant les gradients géométriques avec le regroupement actif. Ce processus, composé de trois étapes - extraction de la carte d'ancrage, regroupement actif et validation du segment de ligne - permet de contrôler les faux positifs et d'opérer plus rapidement (Zhang et *al.*, 2023).

Pour caractériser les segments de lignes détectés par l'algorithme LSD, plusieurs études ont évoqué les méthodes de description existantes. Elles ont suggéré l'utilisation d'approches d'apprentissage pour générer des représentations locales ou globales des segments de lignes. Ces méthodes impliquent des réseaux avec des fonctions de perte adaptées aux ensembles de données préalablement préparés. En combinant plusieurs descripteurs de segments de lignes, il est possible d'améliorer la représentation de ces éléments, une approche couramment utilisée dans ce domaine. Ces descripteurs peuvent être catégorisés en descripteurs binaires et flottants, chacun offrant des avantages spécifiques pour représenter les segments de lignes détectés.

Concernant l'identification des caractéristiques linéaires, Quackenbush (2004) a examiné en détail les méthodes de détection dans les images. Ces méthodes, telles que la morphologie mathématique, la transformée de Hough, la détection des contours à plusieurs résolutions, la correspondance des modèles, la programmation dynamique pour la liaison des contours et la classification basée sur des règles, se sont avérées efficaces pour extraire des caractéristiques comme les routes, les bâtiments, et les cours d'eau. Cependant, leur application directe à l'identification de bandes linéaires de végétation ligneuse est limitée en raison de l'hypothèse de segments de lignes coplanaires et parallèles formant les limites de l'objet. À l'inverse, les zones texturées des régions agricoles génèrent de nombreux petits segments de

ligne, posant des défis de détection. De plus, les bords détectables le long des limites de la végétation présentent souvent des irrégularités significatives.

La littérature présente un large éventail d'études axées sur l'analyse des haies, principalement sur la catégorisation fonctionnelle et l'évolution temporelle. Dans ces études, la cartographie est généralement établie à partir de connaissances préalables ou d'une photo-interprétation manuelle. Les travaux de (Zhang *et al.*, 2023) illustrent une tentative de détection automatisée : ils ont utilisé un amalgame flou d'un indice de végétation, d'une caractéristique de linéarité basée sur le gradient de l'image et de caractéristiques de texture de cooccurrence pour analyser les données acquises à partir d'un capteur hyperspectral aéroporté. Cependant, l'absence d'expériences démontrées empêche de révéler la précision de cette approche.

Conclusion

Cette étude s'est initialement concentrée sur la méthodologie de collecte de données relatives aux éléments linéaires dans le paysage agricole du Lebna, situé dans la péninsule du Cap Bon en Tunisie. L'analyse a révélé une diversité d'éléments linéaires tels que les tronçons de limites de parcelles, de haies, d'oueds, de pistes, de routes ou de chemins, et a souligné leur variabilité en termes de pérennité, de réversibilité et de degré de connectivité. Les résultats ont identifié les tronçons de limites de parcelles comme les plus fréquents, montrant une corrélation étroite entre ces types d'éléments linéaires et des critères comme la pérennité, la réversibilité et la connectivité.

La deuxième partie de cette étude s'est penchée sur l'analyse spatiale des éléments linéaires dans le bassin versant du Lebna afin de comprendre l'organisation en clusters de certaines parcelles agricoles. Les résultats ont révélé une densité accrue d'éléments linéaires et de leurs nœuds de connexion au sein des zones de clusters, comme illustré par une densité moyenne de 68 éléments linéaires/km² dans la zone 1. Une disparité significative dans la densité des éléments à l'intérieur et à l'extérieur des clusters (respectivement 103 éléments/km² et 56 éléments/km²) a été observée, soulignant une organisation en clusters sans isolation géographique des autres parcelles. Cette configuration encourage la synchronisation des choix culturels et des interventions agricoles.

La troisième partie de cette étude s'est attelée à la modélisation conceptuelle des éléments linéaires dans le bassin versant de Lebna en se basant sur les données littéraires et les résultats obtenus. Cette modélisation a éclairci le rôle des éléments linéaires dans toutes les composantes spatiales et non spatiales de ce bassin versant. Elle a également remis en question le rôle de l'opérateur dans la gestion des clusters, ainsi que l'influence de ces éléments sur les choix de cultures et les pratiques agricoles.

Enfin, l'étude a exploré l'efficacité de la méthode de détection de segments de lignes (LSD) dans l'extraction des éléments linéaires à partir d'images satellites à très haute résolution spatiale. Malheureusement, cette méthode s'est avérée inefficace pour une extraction précise des éléments linéaires, détectant de petits segments et produisant plusieurs faux positifs.

En conclusion, les éléments linéaires représentent une composante essentielle du paysage agricole, surtout dans le cas d'une fragmentation prononcée. Bien qu'ils exercent une influence sur l'allocation des cultures, cette influence est négligeable par rapport à d'autres facteurs socio-économiques, culturels, personnels pour les agriculteurs et environnementaux. Bien que identifiables par des outils de télédétection à très haute résolution, ces méthodes

nécessitent encore des développements. De plus, l'étude appelle à étudier la dynamique spatio-temporelle de ces éléments linéaires et à vérifier la robustesse des méthodes d'apprentissage automatique pour leur extraction et leur description thématique.

Références bibliographiques

- Aksoy, S., Akcay, H. Gö., & Wassenaar, T. (2010).** Automatic Mapping of Linear Woody Vegetation Features in Agricultural Landscapes Using Very High Resolution Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(1), 511-522. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2027702>
- Al-Fedaghi, S. (2021).** Conceptual Data Modeling : Entity-Relationship Models as Thinging Machines. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 21(9), 247-260. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.9.33>
- Bailly, J. S., Lagacherie, P., Millier, C., Puech, C., & Kosuth, P. (2008).** Agrarian landscapes linear features detection from LiDAR : Application to artificial drainage networks. *International Journal of Remote Sensing*, 29(12), 3489-3508. <https://doi.org/10.1080/01431160701469057>
- Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A. C., Galli, M., Lardon, S., Rapey, H., Thenail, C., & Bonari, E. (2012).** Landscape agronomy : A new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 27(10), 1385-1394. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9802-8>
- Biarnès A. et Mekki I. (2018).** Communication interne dans le LMI NAILA.
- Biarnès, A., Bailly, J.-S., Mekki, I., & Ferchichi, I. (2021).** Land use mosaics in Mediterranean rainfed agricultural areas as an indicator of collective crop successions : Insights from a land use time series study conducted in Cap Bon, Tunisia. *Agricultural Systems*, 194, 103281. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103281>
- Burel, F. (2005).** Habitat quality and connectivity in agricultural landscapes : The role of land use systems at various scales in time. *Ecological Indicators*, 5, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.04.002>
- Castellazzi, M. S., Perry, J. N., Colbach, N., Monod, H., Adamczyk, K., Viaud, V., & Conrad, K. F. (2007).** New measures and tests of temporal and spatial pattern of crops

- in agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1), 339-349.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.06.003>
- Cho, N.-G., Yuille, A., & Lee, S.-W. (2018).** A Novel Linelet-Based Representation for Line Segment Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(5), 1195-1208. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2703841>
- Clavel, L., Soudais, J., Baudet, D., & Leenhardt, D. (2011).** Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy*, 28(1), 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.05.001>
- Dalgaard, T., Hutchings, N., & Porter, J. (2003).** Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100, 39-51.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00152-X)
- Demetriou, D., Stillwell, J., & See, L. (2013).** A new methodology for measuring land fragmentation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, 71-80.
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.02.001>
- DINAMIS, (2022).** Consulté 23 septembre 2023, à l'adresse <https://dinamis.data-terra.org/>
- Gioi, R. G. von, Jakubowicz, J., Morel, J.-M., & Randall, G. (2012).** LSD : A Line Segment Detector. *Image Processing On Line*, 2, 35-55. <https://doi.org/10.5201/ipol.2012.gjmr-lsd>
- Houet, T., Schaller, N., Castets, M., & Gaucherel, C. (2014).** Improving the simulation of fine-resolution landscape changes by coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(9), 1848-1876. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.900775>
- Joannon, A., Bro, E., Thenail, C., & Baudry, J. (2008).** Crop patterns and habitat preferences of the grey partridge farmland bird. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(3), 379-387. <https://doi.org/10.1051/agro:2008011>

- Levavasseur, F., Lagacherie, P., Bailly, J.-S., Biarnes, A., & Colin, F. (2014).** Spatial modeling of man-made drainage density of agricultural landscapes. *Journal of Land Use Science*, 0, 1-21. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2014.884644>
- Lin, X., Zhou, Y., Liu, Y., & Zhu, C. (2023).** A Comprehensive Review of Image Line Segment Detection and Description : Taxonomies, Comparisons, and Challenges (arXiv:2305.00264). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.00264>
- Markussen, T., Tarp, F., Huy Thiep, D., Anh Tuan, N. D., & UNU-WIDER. (2016).** Inter- and intra-farm land fragmentation in Vietnam (11^e éd., Vol. 2016). UNU-WIDER. <https://doi.org/10.35188/UNU-WIDER/2016/054-6>
- Martínez-Casasnovas, J. A., Martín-Montero, A., & Auxiliadora Casterad, M. (2005).** Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. *European Journal of Agronomy*, 23(2), 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.11.004>
- Mekki, I., Bailly, J. S., Jacob, F., Chebbi, H., Ajmi, T., Blanca, Y., Zairi, A., & Biarnès, A. (2018).** Impact of farmland fragmentation on rainfed crop allocation in Mediterranean landscapes : A case study of the Lebna watershed in Cap Bon, Tunisia. *Land Use Policy*, 75, 772-783. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.004>
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., & Sorvali, J. (2017).** Diversity of high-latitude agricultural landscapes and crop rotations : Increased, decreased or back and forth? *Agricultural Systems*, 154, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.011>
- Quackenbush, L. J. (2004).** A Review of Techniques for Extracting Linear Features from Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(12), 1383-1392. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.12.1383>
- Reyes, H. (2010).** Grainlands. The landscape of open fields in a European perspective. *Landscape History*, 31(2), 37-70. <https://doi.org/10.1080/01433768.2010.10594621>

- Rizzo, D., Therond, O., Lardy, R., Murgue, C., & Leenhardt, D. (2019).** A rapid, spatially explicit approach to describe cropping systems dynamics at the regional scale. *Agricultural Systems*, 173, 491-503. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.003>
- Sabir, M., Hérivaux, C., Guillot, F., & Bouaziz, A. (2019).** Dynamique agraire et dynamique paysagères dans le bassin versant du Tleta, Rif Occidental (Maroc). *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamique-agraire-et-dynamique-paysag%C3%A8res-dans-le-Sabir-H%C3%A9rivaux/aea3da6646c942cad7cdc50d09a6843517f1f9fa>
- Schaller, N., Lazrak, E. G., Martin, P., Mari, J.-F., Aubry, C., & Benoît, M. (2012).** Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology*, 27(3), 433-446. <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9691-2>
- Sorel, L., Viaud, V., Durand, P., & Walter, C. (2010).** Modeling spatio-temporal crop allocation patterns by a stochastic decision tree method, considering agronomic driving factors. *Agricultural Systems*, 103(9), 647-655. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.08.003>
- Ståhl, G., Allard, A., Esseen, P.-A., Glimskär, A., Ringvall, A., Svensson, J., Sundquist, S., Christensen, P., Torell, A., Högström, M., Lagerqvist, K., Marklund, L., Nilsson, B., & Inghe, O. (2010).** National Inventory of Landscapes in Sweden (NILS)—Scope, Design, and Experiences from Establishing a Multiscale Biodiversity Monitoring System. *Environmental monitoring and assessment*, 173, 579-595. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1406-7>
- Tansey, K., Chambers, I., Anstee, A., Denniss, A., & Lamb, A. (2009).** Object-oriented classification of very high resolution airborne imagery for the extraction of hedgerows

- and field margin cover in agricultural areas. *Applied Geography*, 29(2), 145-157.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.08.004>
- Thenail, C. (2002).** Relationships between farm characteristics and the variation of the density of hedgerows at the level of a micro-region of bocage landscape. Study case in Brittany, France. *Agricultural Systems*, 71(3), 207-230. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00048-8)
- Thenail, C., Joannon, A., Capitaine, M., Souchère, V., Mignolet, C., Schermann, N., Di Pietro, F., Pons, Y., Gaucherel, C., Viaud, V., & Baudry, J. (2009).** The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3), 207-219.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.015>
- van der Zanden, E. H., Verburg, P. H., & Mùcher, C. A. (2013).** Modelling the spatial distribution of linear landscape elements in Europe. *Ecological Indicators*, 27, 125-136.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.12.002>
- Vannier, C., Vasseur, C., Hubert-Moy, L., & Baudry, J. (2011).** Multiscale ecological assessment of remote sensing images. *Landscape Ecology*, 26(8), 1053-1069.
<https://doi.org/10.1007/s10980-011-9626-y>
- Wascher, D. M., van Eupen, M., Mùcher, C. A., & Geijzendorffer, I. R. (2010).** Biodiversity of European agricultural landscapes.
- Yang, L., Xie, Z., & Liu, H. (2019).** LB-LSD : A length-based line segment detector for real-time applications. *Pattern Recognition Letters*, 128.
<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.09.011>
- Zhang, X., Hu, C., Liu, H., Du, R., Zhou, X., & Wang, L. (2023).** A Line Segment Detector for Space Target Images Robust to Complex Illumination. *Aerospace*, 10(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/aerospace10020195>

Zhang, Y., Wei, D., & Li, Y. (2021). AG3line : Active Grouping and Geometry-Gradient Combined Validation for Fast Line Segment Extraction. *Pattern Recognition*, 113, 107834. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.107834>

Annexes

Annexes 1 :



Figure : Exemple d'un tronçon de piste, pérenne, traversable, connecté (degré 2) prélevé le 14 avril 2023 au Lebna.



Figure : Exemple d'un tronçon d'autres limites de parcelles, pérenne, franchissable, connecté (degré de connexion 3) prélevé le 14 avril 2023 au Lebna.

Annexe 2 :

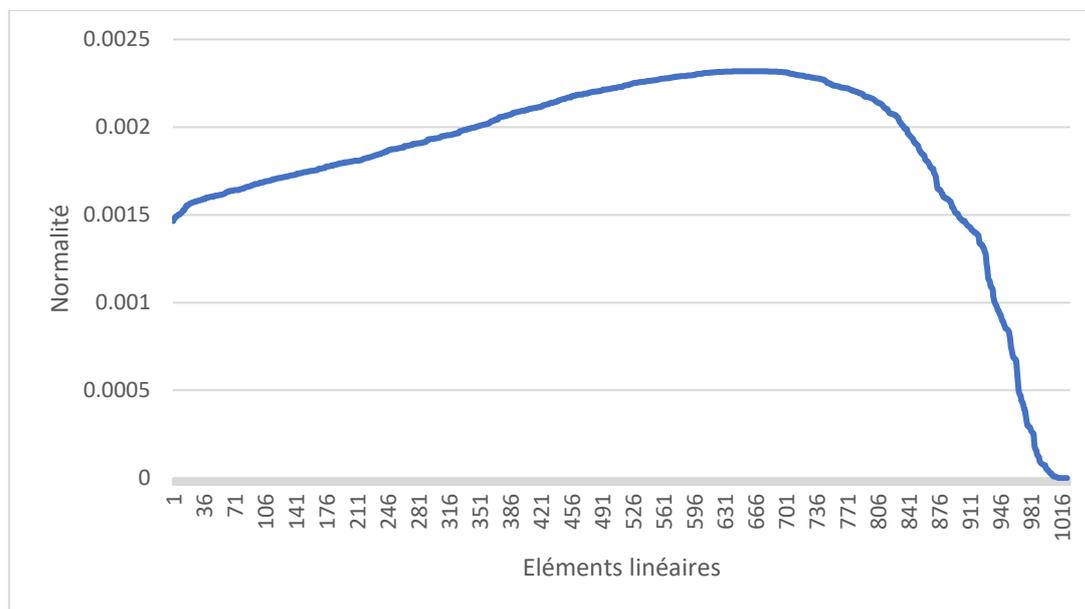


Figure : Courbe de la distribution de la longueur des éléments linéaires.