



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° d'ordre: M2..... /GC/2026

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Travaux publics

Option : Voie et Ouvrage d'Art (VOA)

Thème :

Développement d'une géodatabase SIG dédiée à l'auscultation routière et  
orientée vers l'intégration future de l'intelligence artificielle et de la  
photogrammétrie

Présenté Par :

- BACHIR BEY ABD ELHAFID

Soutenu le 28 /06/2026 devant le jury composé de :

|           |                           |                          |
|-----------|---------------------------|--------------------------|
| Président | Prof. KADRI Tahar         | Université de Mostaganem |
| Examineur | Prof. BOUHAMOU Nasreddine | Université de Mostaganem |
| Encadreur | Dr. Zaoui Mohamed         | Université de Mostaganem |

Année Universitaire 2025/2026

# REMERCIEMENT

Tout d'abord Al-hamdoullillah, Grâce à Dieu, mon succès ne vient que de Dieu, qui nous a donné la force, la volonté, le courage et la patience à mener ce travail à son terme dans les meilleures conditions

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **Dr. ZAOUI Mohamed** pour son encadrement, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de ce travail

Je tiens à remercier l'ensemble de mes professeurs pour Savoir et chaque information qu'ils ont bien voulu me transmettre. Sans leur enseignement précieux et leur dévouement, nous ne serions pas parvenus à ce stade de notre parcours académique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **mes parents** pour leur soutien moral et matériel tout au long de mon parcours académique. Leurs sacrifices, leur patience et leur confiance en moi

Je remercie chaleureusement ma famille et tous les amis qui ont étudié avec moi pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur patience, qui ont été pour moi une source de motivation inestimable

Enfin, j'adresse ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

## DÉDICACE

À mes chers parents,  
qui ont été mon soutien, mon aide et mes prières à chaque étape de mon parcours.

À tous ceux qui ont tant sacrifié pour me permettre d'arriver là où je suis aujourd'hui.

Je vous dédie humblement ce travail en témoignage de ma profonde gratitude, de mon respect  
et de ma reconnaissance éternelle.

À ma famille,  
pour leur affection, leur encouragement permanent et leur confiance.

À mon encadreur,  
pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son accompagnement scientifique et son soutien  
tout au long de la réalisation de ce mémoire

À tous mes amis,

Qui ont été pour moi un soutien précieux tout au long de ce parcours. Merci pour votre  
présence, vos encouragements, vos conseils et pour tous les moments partagés qui ont rendu  
ce chemin plus léger et plus agréable.

Aux membres du club scientifique LST,  
en reconnaissance de leur esprit scientifique, de leur collaboration constructive et de leur  
contribution à l'enrichissement de notre parcours académique.

Enfin, à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail,  
qu'elles trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance et de nos sincères  
remerciements.

**ABDELHAFID BACHIR BEY**

## RÉSUMÉ

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la gestion intelligente des infrastructures routières en combinant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et l'intelligence artificielle afin d'optimiser la détection et le suivi des dégradations de chaussée. L'objectif principal est la conception et l'implémentation d'une géodatabase sous ArcGIS Pro destinée à centraliser, organiser et exploiter les données issues d'inspections routières.

L'étude souligne les limites des méthodes d'inspection visuelle traditionnelles, qui sont coûteuses, subjectives et peu adaptées à l'échelle des grands réseaux. Pour pallier ces contraintes, une méthode fondée sur l'acquisition d'images via smartphone, leur géoréférencement par une procédure spécifique, puis leur intégration dans un environnement SIG a été développée et évaluée.

Par ailleurs, le géoréférencement des images acquises joue un rôle essentiel dans leur exploitation spatiale et l'analyse intelligente des données. Cette étape permet d'améliorer la cartographie de l'état des chaussées et de faciliter les analyses spatio-temporelles des dégradations observées.

Les résultats obtenus démontrent que la géodatabase développée constitue un outil opérationnel pour la gestion des informations routières, en facilitant la localisation précise des dégradations, leur suivi et l'aide à la décision pour les opérations de maintenance. Enfin, cette approche ouvre des perspectives prometteuses pour l'intégration de systèmes d'aide à la décision intelligents reposant sur l'IA et l'analyse spatiale avancée 3D.

**Mots clés :** géodatabase, SIG, chaussées souples, le géoréférencement, Dégradation, IA, photogrammétrie 3D.

## ملخص

هذا المذكرة تتدرج في مجال الإدارة الذكية للبنية التحتية الطرقية من خلال الجمع بين نظم المعلومات الجغرافية والذكاء الاصطناعي بهدف تحسين كشف ومتابعة تآكلات وعيوب طبقات الرصف. الهدف الرئيسي هو تصميم وتنفيذ قاعدة بيانات مكانية (geodatabase) ضمن برنامج ArcGIS Pro تهدف إلى تمركز وتنظيم واستغلال البيانات الناتجة عن عمليات التفتيش الطرقي.

تسلط الدراسة الضوء على حدود طرق التفتيش البصرية التقليدية، والتي تُعد مكلفة وذاتية وغير مناسبة لشبكات الطرق الواسعة. للتغلب على هذه القيود، طُوّرت وطُبِّقت طريقة تعتمد على اقتناء صور عبر الهواتف الذكية، ثم إجراء عملية تحديد الموقع الجغرافي لتلك الصور عبر إجراء محدد، وبعدها إدماجها في بيئة نظم المعلومات الجغرافية وتم تقييمها.

علاوة على ذلك، يلعب تحديد الإحداثيات الجغرافية للصور المكتسبة دورًا أساسيًا في استغلالها مكانيًا وفي التحليل الذكي للبيانات. تُمكن هذه الخطوة من تحسين رسم خرائط حالة الرصف وتسهيل التحليلات المكانية-الزمانية للتدهورات المرصودة.

تُظهر النتائج أن قاعدة البيانات المكانية المطورة تُشكّل أداة تشغيلية لإدارة معلومات الطرق، من خلال تسهيل التحديد الدقيق لمواقع التدهورات، ومتابعتها، ودعم اتخاذ القرار لعمليات الصيانة. أخيرًا، تفتح هذه المقاربة آفاقًا واعدة لدمج أنظمة دعم القرار الذكية المبنية على الذكاء الاصطناعي والتحليل المكاني المتقدم ثلاثي الأبعاد.

**الكلمات المفتاحية:** قاعدة بيانات مكانية، نظم المعلومات الجغرافية، أرصفة مرنة، تحديد الموقع الجغرافي، تدهور، الذكاء الاصطناعي، التصوير الفوتوغرافي ثلاثي الأبعاد.

## abstract

This thesis falls within the field of intelligent management of road infrastructure by combining Geographic Information Systems (GIS) and artificial intelligence to optimize the detection and monitoring of pavement distresses. The main objective is the design and implementation of a geodatabase in ArcGIS Pro intended to centralize, organize, and exploit data derived from road inspections.

The study highlights the limitations of traditional visual inspection methods, which are costly, subjective, and ill-suited for large networks. To overcome these constraints, a method based on image acquisition with smartphones, their georeferencing through a specific procedure, and their integration into a GIS environment was developed and evaluated.

Moreover, the georeferencing of the acquired images plays a crucial role in their spatial use and the intelligent analysis of the data. This step improves mapping of pavement condition and facilitates spatio-temporal analyses of observed distresses.

The results show that the developed geodatabase constitutes an operational tool for managing road information by facilitating precise localization of distresses, their monitoring, and decision support for maintenance operations. Finally, this approach opens promising perspectives for integrating intelligent decision-support systems based on AI and advanced 3D spatial analysis.

**Keywords:** geodatabase, GIS, flexible pavements, georeferencing, distress, AI, 3D photogrammetry.

# TABLE DES MATIERES

|  |    |
|--|----|
| REMERCIEMENT.....  | 1  |
| DÉDICACE.....  | 2  |
| RÉSUMÉ .....   | 3  |
| ملخص.....  | 3  |
| TABLE DES MATIERES .....   | 5  |
| LISTES DES TABLES.....   | 10 |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE : .....  | 11 |
| CHAPITRE I : CONTEXTE GÉNÉRAL ET ÉTAT DE L'ART .....                       | 14 |
| I.1 INTRODUCTION .....   | 14 |
| I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES .....                                   | 14 |
| I.2.1 Définition des chaussées .....                                       | 14 |
| I.2.2 Types de chaussées .....   | 15 |
| I.3 PATHOLOGIES DES CHAUSSEES .....  | 15 |
| I.4 DÉGRADATIONS ROUTIÈRES .....   | 16 |
| I.4.1 Définition: .....  | 16 |
| I.4.2 Les types des dégradations .....                                     | 16 |
| I.5 SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE .....                              | 21 |
| I.5.1 Définitions des SIG : .....  | 21 |
| I.5.2 Histories des SIG: .....   | 21 |
| I.5.3 Concepts des SIG : .....   | 22 |
| I.5.4 Objectifs généraux des SIG : .....                                   | 22 |
| I.5.5 Les composants d'un SIG .....  | 23 |
| I.5.6 Role d'un SIG: .....   | 24 |
| I.5.7 Fonctionnalités d'un SIG : .....                                     | 24 |
| I.5.8 La declination d'un SIG: .....                                       | 26 |
| I.5.9. Classification d'un SIG logiciel .....                              | 26 |
| I.5.10 Les modèles d'un SIG .....  | 27 |
| I.5.11. Les données d'un SIG et leurs types .....                          | 28 |
| I.5.12. Domaines application des SIG .....                                 | 29 |
| I.5.13. Les différents types des modèles des données géographiques : ..... | 29 |
| I.5.14. Les disciplines liées au SIG .....                                 | 30 |

|  |           |
|--|-----------|
| I.5.15.2 Système de coordonnées et projection :  | 30        |
| <b>I.6 LA GÉODATABASE</b>  | <b>33</b> |
| I.6.1 Types de géodatabases  | 33        |
| I.6.2 Structure d'une géodatabase  | 34        |
| I.6.3 Gestion des relations et des règles topologiques   | 36        |
| <b>I.7 AUSCULTATION DES CHAUSSEES ROUTIERES</b>  | <b>36</b> |
| I.7.1 Limites des approches actuelles  | 37        |
| <b>I.8 POSITIONNEMENT DU PROJET PROPOSE :</b>  | <b>40</b> |
| <b>I.9 POSITIONNEMENT IA/ 3D</b>   | <b>41</b> |
| <b>I.10 CONCLUSION</b>   | <b>42</b> |
| <b>CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA GEODATABASE</b>  | <b>45</b> |
| 1. ANALYSE DES BESOINS :   | 45        |
| II.2 MODELISATION CONCEPTUELLE DE DONNE :  | 46        |
| II.2.1 Etapes de la conception d'un MCD :  | 47        |
| II.2.2 Élaboration du Modèle Conceptuel de Données   | 48        |
| II.2.3 Analyse du MCD  | 50        |
| II. 3 JUSTIFICATION DES CHOIX  | 51        |
| II. 4 MODELE LOGIQUE DE DONNE  | 53        |
| II.5.2 IMPLEMENTATION ARCGIS PRO (MODEL PHYSIQUE DE DONNE)                                       | 56        |
| II.5.1 Conception du géodatabase selon une approche conventionnelle sous ArcGIS Pro              | 56        |
| II.5.2 Conception automatique du la géodatabase à l'aide de la commande Python sous ArcGIS Pro   | 61        |
| II.6 Structuration orientée IA et 3D :   | 66        |
| <b>CHAPITRE III : ACQUISITION ET ALIMENTATION</b>  | <b>68</b> |
| III.1 DISPOSITIF :   | 68        |
| III.1.1 Caractéristiques du smartphone utilisé pour prendre le vidéo :                           | 69        |
| III.1.2 Application utilisée pour l'acquisition des métadonnées des tronçons : « Geo-Tracker » : | 70        |
| III.2 GEOREFERENCMENT DES IMAGES   | 72        |
| III.3 CHAINE DE TRAITEMENT :   | 72        |
| III.3.1 Extraction des images à partir de la vidéo :   | 72        |

|   |           |
|---|-----------|
| III.3.2 Intégration des métadonnées GPS dans les images à l'aide d'ExifTool : ..... | 74        |
| III.4 INTEGRATION DANS LOGOCIEL SIG « ARCGIS PRO » .....                            | 78        |
| III.5 LIMITES DE CE TRAVAIL .....   | 80        |
| III.5.1 Limites méthodologiques et conceptuelles: .....                             | 80        |
| III.5.2 Limites liées à intelligence artificielle : .....                           | 81        |
| III.5.3 Limites liées à la modélisation 3D et à la photogrammétrie : .....          | 81        |
| .....   | 82        |
| <b>CHAPITRE IV : EXPLOITATION ET ANALYSE DES DONNÉES .....</b>                      | <b>83</b> |
| IV.1 INTRODUCTION .....   | 83        |
| IV.2 ANALYSE SPATIALE DES DEGRADATIONS .....  | 83        |
| IV.2.1 Distribution spatiale des dégradations : .....                               | 83        |
| IV.2.2 Analyse de densité des dégradations .....                                    | 83        |
| IV.3 DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'ETAT DES CHAUSSEES .....                         | 84        |
| IV.3.1 Indice de densité des dégradations (IDD) .....                               | 84        |
| IV.3.2 Indice pondéré de dégradation (IPD) .....                                    | 85        |
| IV.3.3 Classification des tronçons .....  | 85        |
| IV.4 PRODUCTION CARTOGRAPHIQUE .....  | 85        |
| IV.5 DISCUSSION DES RESULTATS .....   | 86        |
| IV.6 PERSPECTIVES D'EXPLOITATION .....  | 86        |
| IV.8 VALIDATION SCIENTIFIQUE .....  | 87        |
| IV.9 TABLEAU RÉALISTE .....   | 87        |
| IV.10 INTERPRETATION .....  | 88        |
| IV.11 VALIDATION PAR COHÉRENCE SPATIALE .....                                       | 88        |
| <b>CHAPITRE V : PERSPICTIVE IA et 3D .....</b>                                      | <b>90</b> |
| V.1 INTRODUCTION .....  | 90        |
| V.2.1. Perspective de l'intelligence artificielle : .....                           | 91        |
| V.2.2. Perspectives de la photogrammétrie « 3D » : .....                            | 91        |
| V.3 LES RELATIONS ENTRE CES TECHNOLOGIES ET LA GEODATABASE ...                      | 92        |
| V.3.1. Relation avec l'IA : .....   | 92        |
| V.3.2. Relation avec la photogrammétrie 3D : .....                                  | 92        |
| V.4 L'ARCHITECTURE CIBLE .....  | 92        |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>  | <b>95</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE .....</b> | <b>96</b> |
|---|-----------|

## **LISTE DES FIGURES**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure I.1 : Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée.....</b>   | <b>14</b> |
| <b>Figure I.2 : Fissure longitudinale .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>Figure I.3 : Fissure transversale .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>Figure I.4 : Faïençage .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>Figure I.5 : Affaissement .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>Figure I.6 : Flache .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>Figure I.7 : Nid de poule .....</b>   | <b>19</b> |
| <b>Figure I.8 : L’orniérage .....</b>  | <b>19</b> |
| <b>Figure I.9 : Les composants d’un SIG .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>Figure I.10 : Les fonctionnalités d’un SIG .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>Figure I.11 : Organigramme d’un SIG .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>Figure I.12 : Classification des logiciels .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>Figure I.13 : Les données géométriques d’un SIG .....</b>   | <b>25</b> |
| <b>Figure I.14 : Système de coordonnées géographiques .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>Figure I.15 : Système de coordonnées projetées SCP .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>Figure I.16 : Projection Lambert Algérie .....</b>  | <b>28</b> |
| <b>Figure I.17 : Projection de Lambert .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>Figure I.18 : Modèle structurel d’une géodatabase SIG .....</b>   | <b>34</b> |
| <b>Figure I.19 : Fiche d’auscultation classique des dégradations de chaussée sur la route nationale RN11A (wilaya de Mostaganem) .....</b> | <b>37</b> |
| <b>Figure I.20 : Véhicule d’auscultation routière automatisé « SCANROAD » .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>Figure II.1 : Schéma représentatif du modèle conceptuel de données (MCD) .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>Figure II.2 : schéma représentatif du modèle logique de donner (MLD).....</b>   | <b>55</b> |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.3</b> : Création et enregistrement d'une géodatabase fichier .....  | 56 |
| <b>Figure II.4</b> : Choix du système de coordonnées .....   | 57 |
| <b>Figure II.5</b> : Localisation du tronçon sous Google Maps .....  | 58 |
| <b>Figure II.6</b> : Importation et stockage des images géoréférencées dans ArcGIS Pro .....   | 58 |
| <b>Figure II.7</b> : Organisation des tables attributaires de la géodatabase sous ArcGIS Pro .....                                   | 59 |
| <b>Figure II.8</b> : Paramétrage et gestion des relations sous ArcGIS Pro .....  | 59 |
| <b>Figure II.9</b> : Résultat d'exécution du programme Python dédié à la conception automatique de la géodatabase.....               | 63 |
| <b>Figure II.10</b> : Vue du catalogue de la géodatabase dans ArcGIS Pro.....  | 63 |
| <b>Figure II.11</b> : Configuration des domaines attributaires dans la géodatabase .....   | 64 |
| <b>Figure II.12</b> : Classeur Excel multi-feuilles dédié à la gestion et à l'analyse des données d'auscultation.....                | 65 |
| <b>Figure II.13</b> : Rapport du texte récapitulatif généré automatiquement.....   | 67 |
| <b>Figure III.1</b> : Système d'acquisition et enregistrement vidéo avec smartphone fixé sur le véhicule à l'aide d'un support ..... | 69 |
| <b>Figure III.2</b> : iPhone 17 Pro Max .....  | 70 |
| <b>Figure III.3</b> : Les paramètres d'enregistrement dans l'application Geo-Tracker .....   | 71 |
| <b>Figure III.4</b> : Paramètre d'affichage des métadonnées sous Geo-Tracker .....   | 72 |
| <b>Figure III.5</b> : Extraction des images à partir de FFmpeg .....   | 74 |
| <b>Figure III.6</b> : Images converties à partir de FFmpeg .....   | 75 |
| <b>Figure III.7</b> : Fenêtre de commande illustrant les fonctionnalités de « ExifTool » .....                                       | 76 |
| <b>Figure III.8</b> : Traitement des images avec ExifTool pour corriger l'horodatage d'origine ...                                   | 77 |
| <b>Figure III.9</b> : Ouverture d'un fichier GPX GeoTracker dans Chrome sur PC .....   | 78 |
| <b>Figure III.10</b> : Affichage des coordonnées GPS dans les propriétés des images .....  | 79 |
| <b>Figure III.11</b> : Résultats du géoréférencement des images géolocalisées dans ArcGIS Pro.                                       | 80 |
| <b>Figure III.12</b> : Visualisation des images géolocalisées dans la géodatabase sous ArcGIS Pro.....                               | 81 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure V.1</b> : Relation entre l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique ..... |    |
| l'apprentissage profond et les domaines de l'analyse spatiale .....                               | 91 |
| <b>Figure V.2</b> : Schéma descriptif de l'architecture cible du projet .....                     | 95 |

## LISTES DES TABLES

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau I.1</b> : Présentation des principaux types de multi-données .....                | 29 |
| <b>Tableau II.1</b> : Justification des entités, tables et attributs de la géodatabase ..... | 50 |
| <b>Tableau II.2</b> : Justification des relations entre les entités de la géodatabase .....  | 51 |
| <b>Tableau II.3</b> : Présentation du modèle logique de données (MLD) .....                  | 52 |
| <b>Tableau II.4</b> : Relations logiques entre les différentes tables du modèle .....        | 54 |
| <b>Tableau IV</b> : Analyse des niveaux de dégradation des chaussées.....                    | 87 |

## INTRODUCTION GÉNÉRALE :

La gestion des infrastructures routières constitue aujourd'hui un enjeu stratégique majeur pour les collectivités territoriales et les organismes chargés de l'entretien du réseau routier. Les chaussées jouent un rôle essentiel dans le développement économique, la mobilité des populations et la sécurité des usagers. Toutefois, sous l'effet combiné de l'augmentation du trafic, des conditions climatiques, du vieillissement des matériaux et des défauts de construction, les routes subissent progressivement diverses formes de dégradations telles que les fissures, les nids-de-poule, les affaissements et les déformations de surface [1], [2], [4]. Ces altérations affectent directement la qualité du service offert aux usagers et génèrent des coûts de maintenance importants lorsqu'elles ne sont pas détectées et traitées à temps.

Traditionnellement, l'évaluation de l'état des chaussées repose sur des inspections visuelles réalisées par des experts sur le terrain. Bien que largement répandues, ces méthodes présentent plusieurs limites, notamment en termes de coût, de temps de collecte, de subjectivité des observations et de difficulté à assurer un suivi régulier sur de vastes réseaux routiers [10], [11], [43]. Face à ces contraintes, de nouvelles approches fondées sur les technologies numériques ont émergé afin d'améliorer les processus d'inspection, de diagnostic et de gestion des infrastructures routières.

Les avancées récentes dans les domaines de la vision par ordinateur et de l'intelligence artificielle ont ouvert de nouvelles perspectives pour l'automatisation de la détection et de la classification des dégradations routières. En particulier, les techniques d'apprentissage profond (Deep Learning), notamment les architectures de type YOLO, ont démontré leur efficacité pour identifier automatiquement différents types de défauts à partir d'images acquises sur le terrain [3], [5], [37], [48]. Ces approches permettent d'obtenir des résultats rapides et précis tout en réduisant considérablement l'intervention humaine dans les opérations d'inspection.

Dans le cadre de cette étude, les images acquises ont fait l'objet d'un géoréférencement selon une méthode spécifique développée afin d'associer avec précision chaque image à sa position géographique. Cette démarche permet de localiser les dégradations détectées, de faciliter leur cartographie et d'assurer leur intégration dans un environnement SIG dédié au suivi de l'état des chaussées [16], [20], [31].

Cependant, l'exploitation efficace de ces données nécessite une organisation rigoureuse ainsi que des structures adaptées à leur stockage, leur gestion et leur analyse. Dans ce contexte, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et les géodatabases constituent des outils

essentiels pour intégrer, structurer et exploiter les informations spatiales relatives aux infrastructures routières [7], [8], [9], [38]. Les géodatabases permettent de centraliser les données géographiques, les observations de terrain et les résultats issus des traitements d'intelligence artificielle, garantissant ainsi une gestion cohérente et durable du patrimoine routier.

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir et de développer une géodatabase sous ArcGIS Pro, pensée comme un socle structurant pour la gestion des dégradations routières. Cette géodatabase a pour vocation de centraliser, organiser et valoriser les données issues des inspections routières ainsi que les informations géolocalisées produites par les méthodes de détection automatisée. Elle constitue un environnement de référence permettant la cartographie, le suivi spatial et l'analyse des dégradations, tout en préparant l'intégration future des systèmes intelligents d'aide à la décision pour la gestion et la maintenance du réseau routier.

A decorative border in red, shaped like a scroll, framing the chapter title. It has rounded corners and a vertical strip on the left side.

**CHAPITRE I :**  
**CONTEXTE GÉNÉRAL ET ÉTAT**  
**DE L'ART**

# CHAPITRE I : CONTEXTE GÉNÉRAL ET ÉTAT DE L'ART

## I.1 INTRODUCTION

Le réseau routier constitue l'un des éléments fondamentaux du développement économique, social et territorial d'un pays. Les infrastructures routières jouent un rôle stratégique dans la mobilité des personnes, le transport des marchandises et le développement des échanges économiques. Toutefois, sous l'effet du trafic routier, des conditions climatiques et du vieillissement des matériaux, les chaussées subissent progressivement différentes formes de dégradations affectant leur performance structurelle et fonctionnelle. [1]

Dans ce contexte, l'auscultation routière représente une opération essentielle permettant d'évaluer l'état des chaussées, d'identifier les dégradations existantes et de planifier les opérations de maintenance et de réhabilitation. Historiquement, les méthodes d'auscultation reposaient principalement sur des inspections visuelles manuelles réalisées par des experts sur terrain. Bien que largement utilisées, ces approches présentent plusieurs limites liées à la subjectivité des évaluations, au temps important nécessaire à l'acquisition des données et à la difficulté d'assurer une gestion structurée et évolutive des informations collectées [2]

Avec l'évolution des technologies numériques, les Systèmes d'Information Géographique (SIG), la photogrammétrie, les technologies de géolocalisation et l'intelligence artificielle occupent aujourd'hui une place centrale dans la modernisation des systèmes d'auscultation routière. Les approches basées sur les images géoréférencées et les techniques de deep learning permettent désormais d'automatiser la détection et la classification des dégradations routières avec des performances élevées [3]. Dans ce chapitre, une synthèse scientifique est présentée concernant les chaussées routières, les principales dégradations observées, les méthodes d'auscultation, les SIG, les géodatabases ainsi que les technologies récentes fondées sur l'intelligence artificielle et la modélisation 3D appliquées au domaine routier.

## I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES

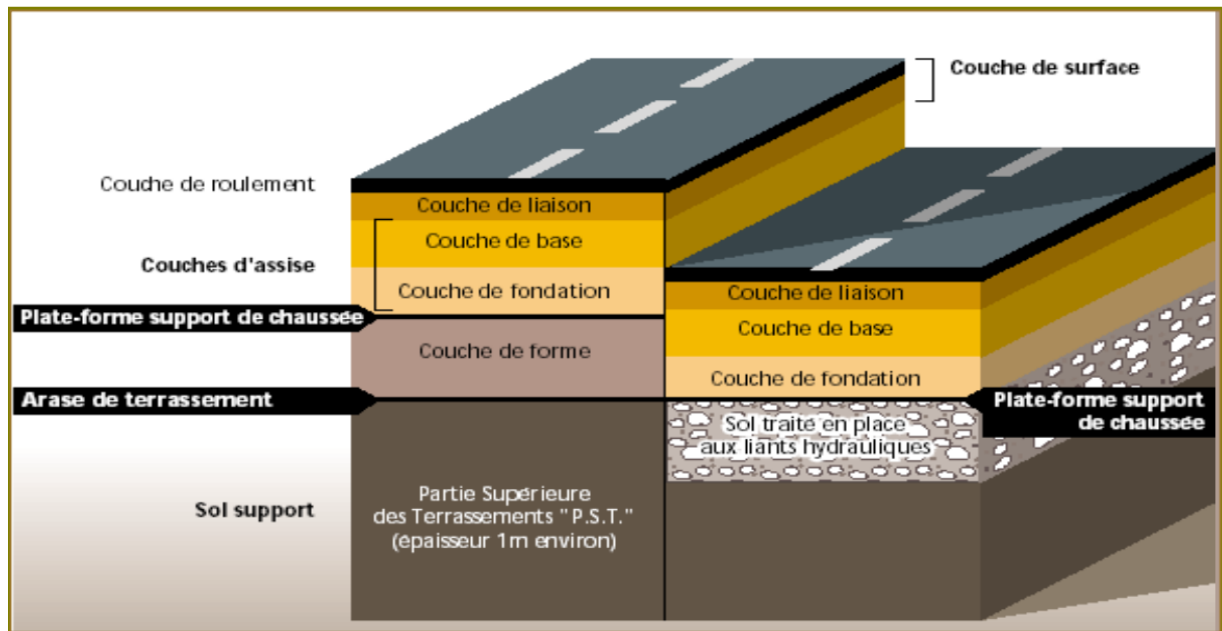
### I.2.1 Définition des chaussées

Les chaussées sont des structures constituées de plusieurs couches surmontant un ensemble appelé plateforme ou support de la chaussée, constitué du sol support le plus souvent protégé par une couche de forme.

Sur le plan structural, les chaussées se présentent comme des structures multicouches disposées horizontalement et mises en œuvre sur un ensemble géologique appelé plate-forme. Celle-ci est

constituée du sol du terrain naturel terrassé (sol support), surmonté au besoin d'une couche de forme.[4]

Comme l'illustre la **Figure I.1**, le corps de chaussée est généralement composé, de bas en haut, de plusieurs couches assurant la stabilité, la résistance et la durabilité de l'infrastructure routier :



**Figure I.1** : Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée [4]

## I.2.2 Types de chaussées

Les chaussées routières peuvent être classées en plusieurs catégories selon les matériaux utilisés et leur comportement mécanique :

Il y a une grande diversité de structures de chaussée, que l'on classe dans les familles suivantes :[4]

- Souples
- Bitumineuses épaisses
- A assise traitée aux liants hydrauliques
- A structure mixte
- A structure inverse
- En béton de ciment

## I.3 PATHOLOGIES DES CHAUSSEES

Les pathologies routières désignent l'ensemble des dégradations affectant les performances structurelles et fonctionnelles des chaussées. Ces dégradations peuvent être causées par:[6]

- Le trafic Lourd
- Les variations thermiques
- L'infiltration d'eau
- Le vieillissement des matériaux
- Les défauts de construction

## **I.4 DÉGRADATIONS ROUTIÈRES**

### **I.4.1 Définition:**

Une dégradation de chaussée se définit comme une détérioration, localisée ou étendue, du revêtement routier ou de ses couches structurelles. Elle résulte de sollicitations mécaniques (trafic), de facteurs environnementaux (humidité, variations de température) ou de défauts de conception et d'exécution, et entraîne une altération des performances fonctionnelles et/ou mécaniques de la structure de chaussée.[5]

De manière générale, les dégradations observées sur les chaussées souples se classent en quatre grandes familles :[5]

- Les fissurations
- Les déformations
- Les arrachements
- Les remontées de matériaux

### **I.4.2 Les types des dégradations**

#### **I.4.2.1 La famille des fissurations**

##### **I.4.2.1.1 Les fissurations longitudinales**

La fissuration longitudinale se caractérise par une rupture qui s'ouvre parallèlement à l'axe de la chaussée, c'est-à-dire dans le sens de la circulation. Elle peut parcourir la chaussée sur une distance importante et traverser partiellement ou entièrement l'épaisseur du revêtement.[5]

La **Figure I.2** illustre un exemple de ce type de dégradation :



**Figure I.2:** fissure longitudinale

#### **I.4.2.1.2 Fissures Transversales**

Les fissures transversales se manifestent perpendiculairement à l'axe de la chaussée. Elles touchent principalement la couche de roulement et, si elles ne sont pas traitées en temps utile, peuvent évoluer vers des pathologies plus sévères.

Comme l'illustre la figure I.3 suivante :[5]



**Figure I.3:** fissure transversal

#### **I.4.2.1.3 Le faïençage:**

Le faïençage est par définition un ensemble de fissures plus ou moins rapprochées formant des mailles. Elles sont dites à mailles fines ou peaux de crocodiles [5]

Comme l'illustre la Figure I.4 ci-dessous :



**Figure I.4:** faiençage

## **I.4.2.2 La famille des déformations:**

### **I.4.2.2.1 Affaissement**

L'affaissement constitue une pathologie fréquente affectant les bordures des chaussées souples. Il se traduit par un tassement progressif du revêtement au niveau des accotements, pouvant engendrer des déformations significatives et compromettre la sécurité des usagers [5]

Comme l'illustre la figure I.5 suivante :



**Figure I.5:** affaissement

### **I.4.2.2.2 Flache**

La flache correspond à une déformation localisée de la chaussée, généralement visible sous la forme d'un affaissement de plan ovalisé. Elle traduit souvent une faiblesse structurelle de la couche de fondation ou du sous-sol et peut évoluer vers des pathologies plus graves en l'absence d'intervention corrective [5]. Cette dégradation est illustrée à la Figure I.6 ci-après :



**Figure I.6:** Flache.

### **I.4.2.3 Famille des arrachements**

#### **I.4.2.3.1 Nid de poule:**

Les nids-de-poule sont des trous présents à la surface de la chaussée qui laissent apparaître les couches de structure. Ils sont dus à un départ du matériau facilité par l'infiltration et l'accumulation des eaux de ruissellement. À ce stade, si aucune réparation n'est réalisée, l'étanchéité de la structure de la chaussée n'est plus assurée et sa dégradation va rapidement se propager [6]. La Figure I.7 ci-après illustre cette dégradation :

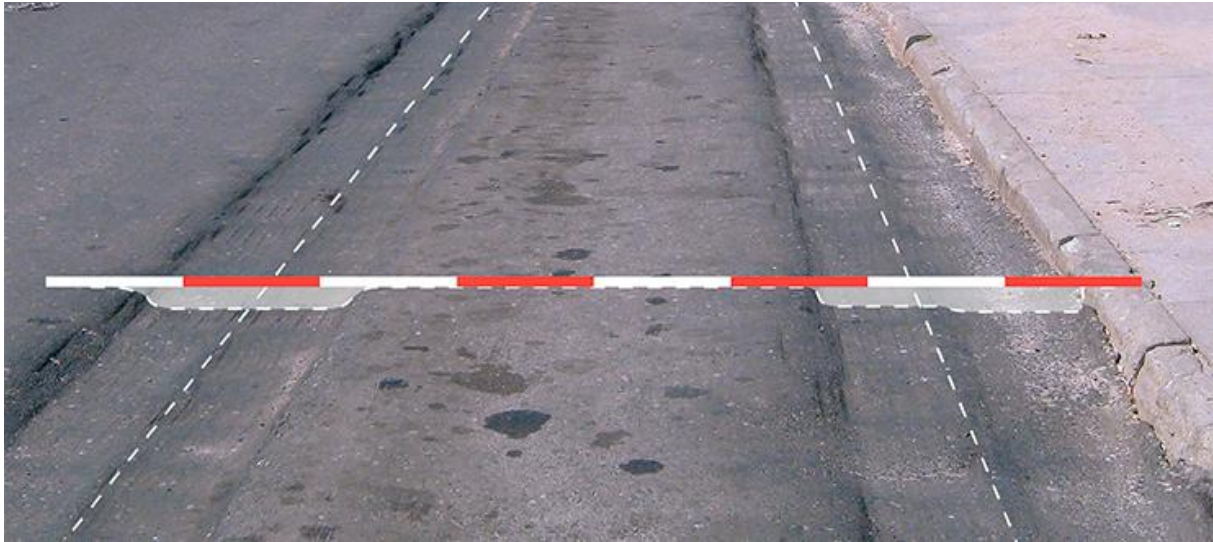


**Figure I.7:** Nid de poule

### I.4.2.3.2 L'orniérage:

L'orniérage est un tassement longitudinal de la chaussée localisé au niveau des bandes de roulement qui est dû à une fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures, lié à un défaut de portance du sol, ou à un sous-dimensionnement de la structure de la chaussée [6]

Comme le montre la figure I.8 suivante :



**Figure I.8 :** L'orniérage

**Remarque :** Dans ce chapitre, nous avons présenté uniquement les types de dégradations les plus courants, nous ne les avons pas tous traités en détail. Pour un inventaire plus complet, incluant descriptions et illustrations de l'ensemble des pathologies de chaussée, consulter le fichier disponible à l'adresse suivante : <https://tpdemain.com/>.

## I.5 SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

### I.5.1 Définitions des SIG :

Un Système d'Information Géographique (S.I.G) est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser toutes les choses qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent. C'est donc un système permettant de communiquer et de traiter l'information géographique : un S.I.G a ainsi pour vocation d'informer l'utilisateur sur les éléments d'un territoire (objets ou phénomènes physiques, êtres vivants...) ou sur le territoire lui-même, le paramètre essentiel étant la localisation (tel objet est voisin de tel autre...).

Un S.I.G est à la fois **un outil de gestion de l'espace** (gestion de bases de données pour la saisie, le stockage, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées) et **un outil d'aide à la décision**

Un Système d'Information Géographique est l'ensemble des structures, des méthodes, des outils et des données constituées pour rendre compte des phénomènes localisés dans un espace spécifique et faciliter les décisions à prendre sur cet espace" (T. Joliveau, CRENAM).

[7]

### I.5.2 Histories des SIG:

Tout commence en 1854, lorsque le Dr John Snow réalise une étude géolocalisée de l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres. Ses résultats, montrant que l'épidémie était liée à un puits contaminé, constituent l'une des premières applications de l'analyse spatiale des phénomènes.

Dans les années 1960, la planification de nouvelles plantations forestières en Afrique de l'Est a mis en évidence les limites des cartes papier existantes et a suscité l'utilisation de l'informatique pour le traitement des données cartographiques.

Les progrès des technologies informatiques depuis les années 1970 ont permis l'essor des systèmes d'information géographique (SIG) et l'application de ces outils dans de nombreux domaines scientifiques, en particulier l'aménagement et l'observation du territoire.

Conformément aux travaux de Maguire et al. (1991), l'évolution des SIG se décompose classiquement en quatre périodes principales :

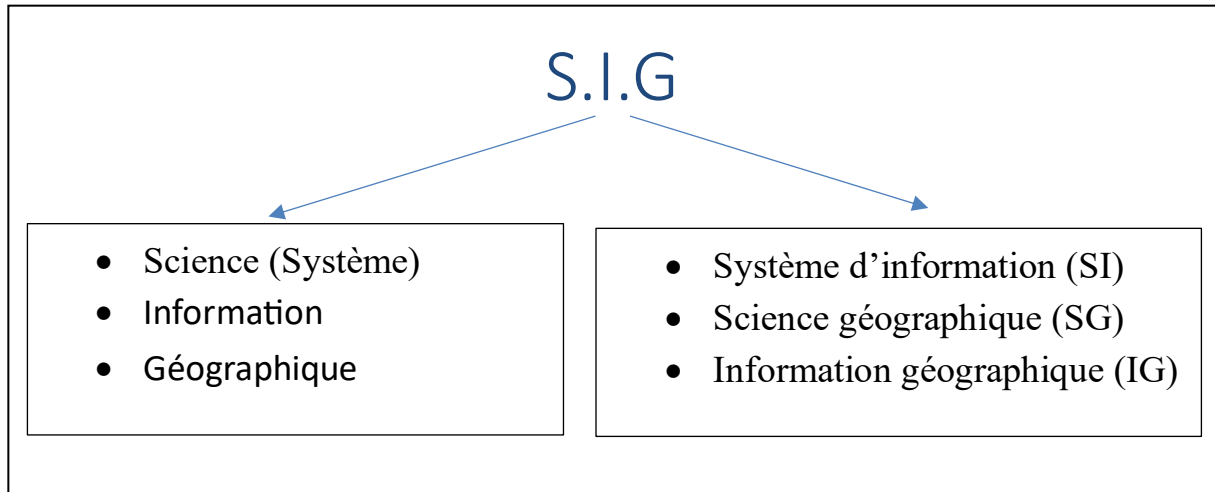
- 1950–1970 : premières applications de l'informatique à la cartographie ;
- 1970–1980 : introduction des outils SIG dans les organismes étatiques forces armées, cadastre, services topographiques, etc.)

- 1980–années 1990 : développement d'applications informatiques dédiées aux SIG et mise en réseau des systèmes ;

- Fin des années 1990 à aujourd'hui : essor du webmapping, diffusion de services cartographiques en ligne, apparition d'outils libres et généralisation de l'usage des technologies GPS.[7]

### I.5.3 Concepts des SIG :

Comme l'illustre la Figure I.9. Les SIG reposent sur plusieurs concepts fondamentaux :



**Figure I.9 :** Les concepts des SIG

### I.5.4 Objectifs généraux des SIG :

Les systèmes d'information géographique (SIG) visent à gérer, analyser et représenter des données spatiales. Leurs fonctions principales sont les suivantes :[7]

- Saisie et stockage des données : numérisation et conservation de données 2D et 3D, associant géométrie et attributs descriptifs pour chaque objet.
- Structuration et modélisation : organisation des données selon des modèles qui reflètent fidèlement le monde réel et les usages des objets.
- Calculs et traitements techniques : mesures (distances, surfaces, volumes), études de visibilité, calculs de trajectoires, gestion des projections.
- Gestion des données : maintenance des collections spatiales via des SGBD, assurant mise à jour, cohérence et liens entre géométrie et attributs.
- Partage et multi-utilisateurs : collaboration, contrôle d'accès et gestion des flux d'information (ex. cadastre).
- Analyse spatiale : requêtes spatiales, jointures géographiques, analyses de proximité et changements d'échelle.

- Gestion spatio-temporelle : intégration de la dimension temporelle pour suivre l'évolution des objets et phénomènes.
- Analyse statistique et géostatistique : applications statistiques et méthodes d'interpolation pour modéliser les phénomènes spatiaux.
- Simulation et modélisation : support de modèles simulant des processus réels, interfacés avec les bases géographiques.
- Télédétection et traitement d'images : intégration, géoréférencement et traitement d'images satellitaires ou aériennes.
- Cartographie et visualisation : production cartographique automatisée et visualisation, y compris 3D.
- Accessibilité en ligne : accès et service des données via Internet (webmapping, services SIG).

### **I.5.5 Les composants d'un SIG**

Un SIG comprend quatre grandes composantes interdépendantes :

**a. Logiciel** : un logiciel SIG, des utilitaires comme Google Earth, Surfer, Global Mapper, logiciels de traitement de texte et image, de calcul, etc.... ;

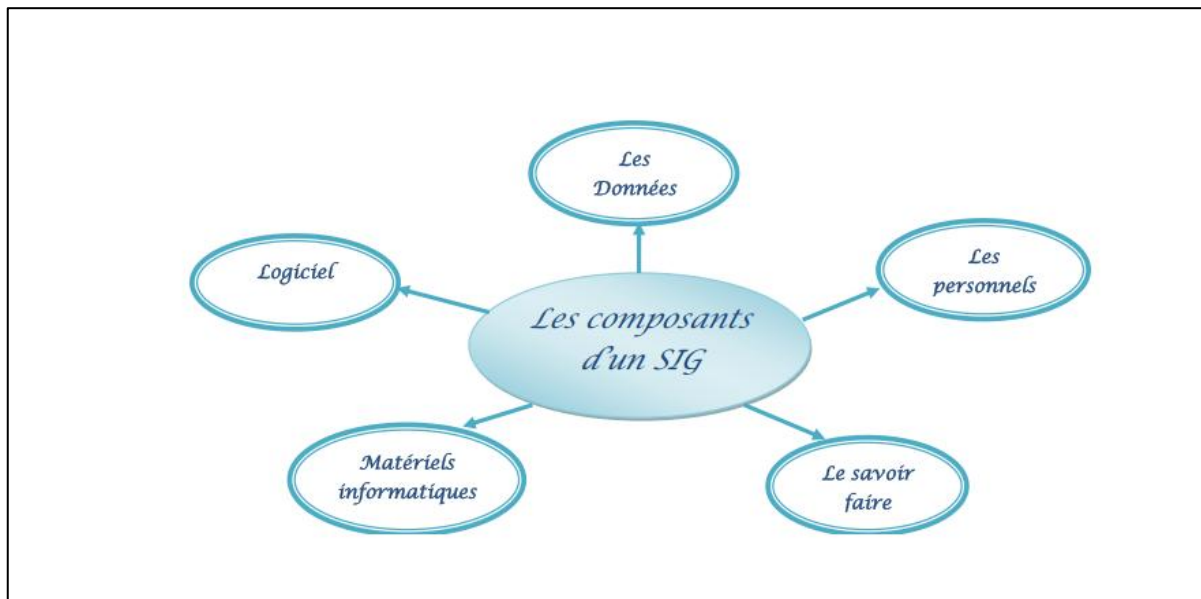
**b. Matériel** : des matériels informatique (pc, internet, micro portable), des moyens roulant, matériel d'acquisition (camera, appareil photo, théodolite) ;

**c. Les données** : plan, carte, image, données multi-date, multi- échèle, multi-résolution, multiformat... ;

**d. Les personnels** : chef du projet, géomaticien, topographe, cartographe, informaticien, hydraulicien... ;

**Le savoir-faire** : Le personnel doit suivre des formations spécifiques pour la réussite de projet SIG.[7]

Ces composantes sont illustrées à la Figure I.10 ci-après



**Figure I.10 :** Les composants d'un SIG.

### I.5.6 Role d'un SIG:

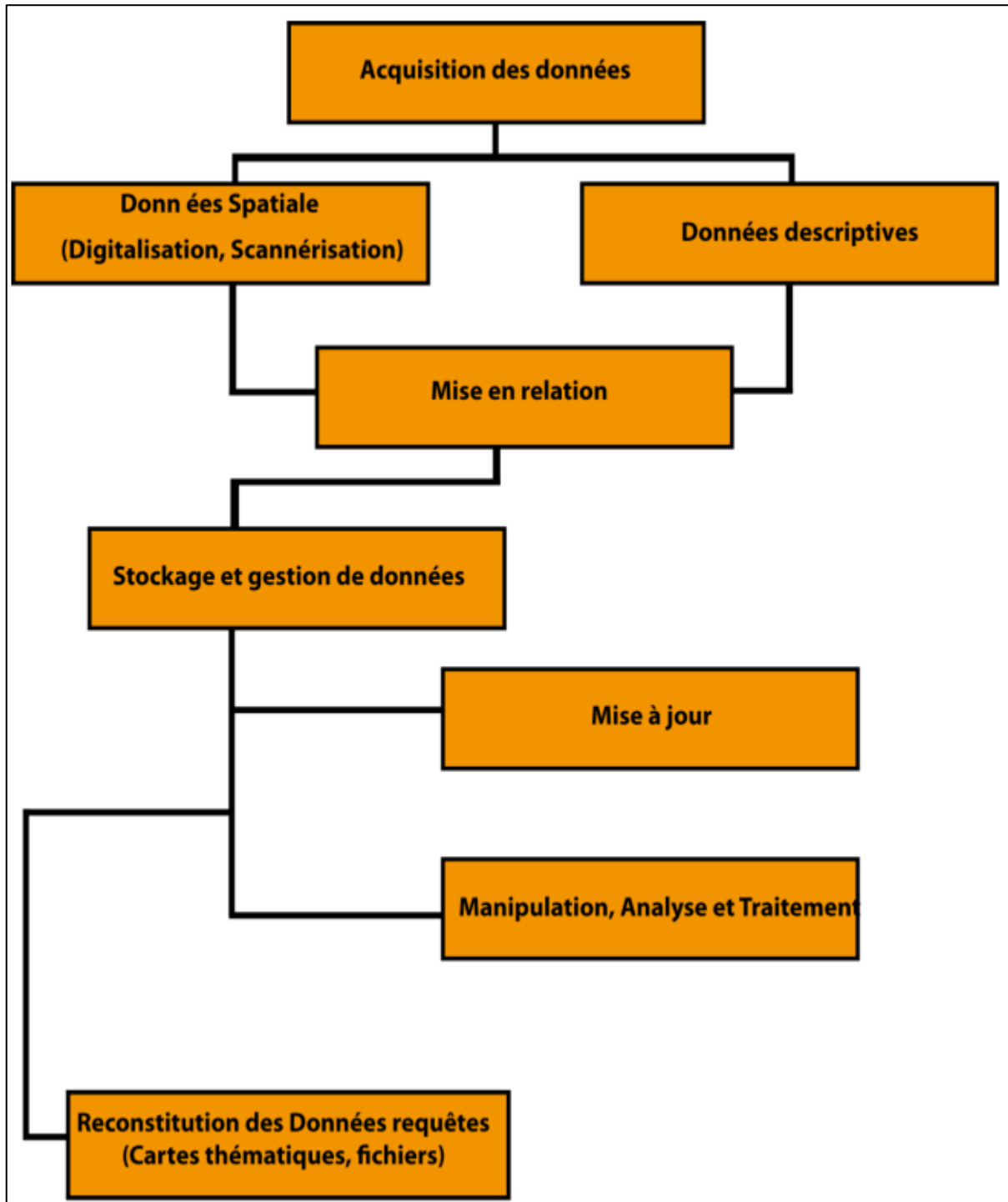
Un SIG répond à 5 grand rôles : [7]

- **Abstraction** : modélisation de façon intellectuelle du monde réel suivant différents prismes.
- **Acquisition** : c'est de trouver, de créer ou acheter une donnée
- **Archivage** : l'intégration ou non d'un Système de Gestion Base de données et l'environnement de travail Analyse : description d'un espace à partir de données alphanumériques.
- **Affichage** : appréhender des phénomènes spatiaux.

### I.5.7 Fonctionnalités d'un SIG :

Un Système d'Information Géographique (SIG) s'appuie sur cinq fonctions essentielles. L'acquisition regroupe l'intégration de données issues de sources variées (imagerie satellite, photogrammétrie, lidar) et leur numérisation en formats raster ou vectoriels. La manipulation vise l'harmonisation des données hétérogènes (échelles, formats, conventions) pour garantir leur compatibilité. Le stockage et la gestion s'effectuent selon les principes des SGBD, assurant intégrité, sécurité et accès aux requêtes spatiales. L'analyse et le traitement réalisent des opérations statistiques, des requêtes attributaires (SQL) et des analyses spatiales. Enfin, la

restitution présente les résultats sous forme de cartes, tableaux, graphiques ou visualisations 3D, facilitant l'interprétation et la prise de décision.[7] la figure ci-après expose les fonctionnalités d'un SIG :



**Figure I.11 :** Les fonctionnalités d'un SIG.

### I.5.8 La déclinaison d'un SIG:

Il est généralement aisé de réfléchir et de générer des idées pour concevoir un outil. En revanche, la mise en œuvre concrète de ces idées s'avère souvent complexe, notamment en raison des contraintes et des obstacles rencontrés lors de l'étude de faisabilité. La transposition du monde réel vers un environnement virtuel, et inversement, constitue un processus exigeant et de grande envergure. C'est pourquoi la maîtrise technique et le savoir-faire apparaissent comme des éléments essentiels et déterminants pour assurer la réussite du projet. Comme le montre la Figure I.12 ci-après:

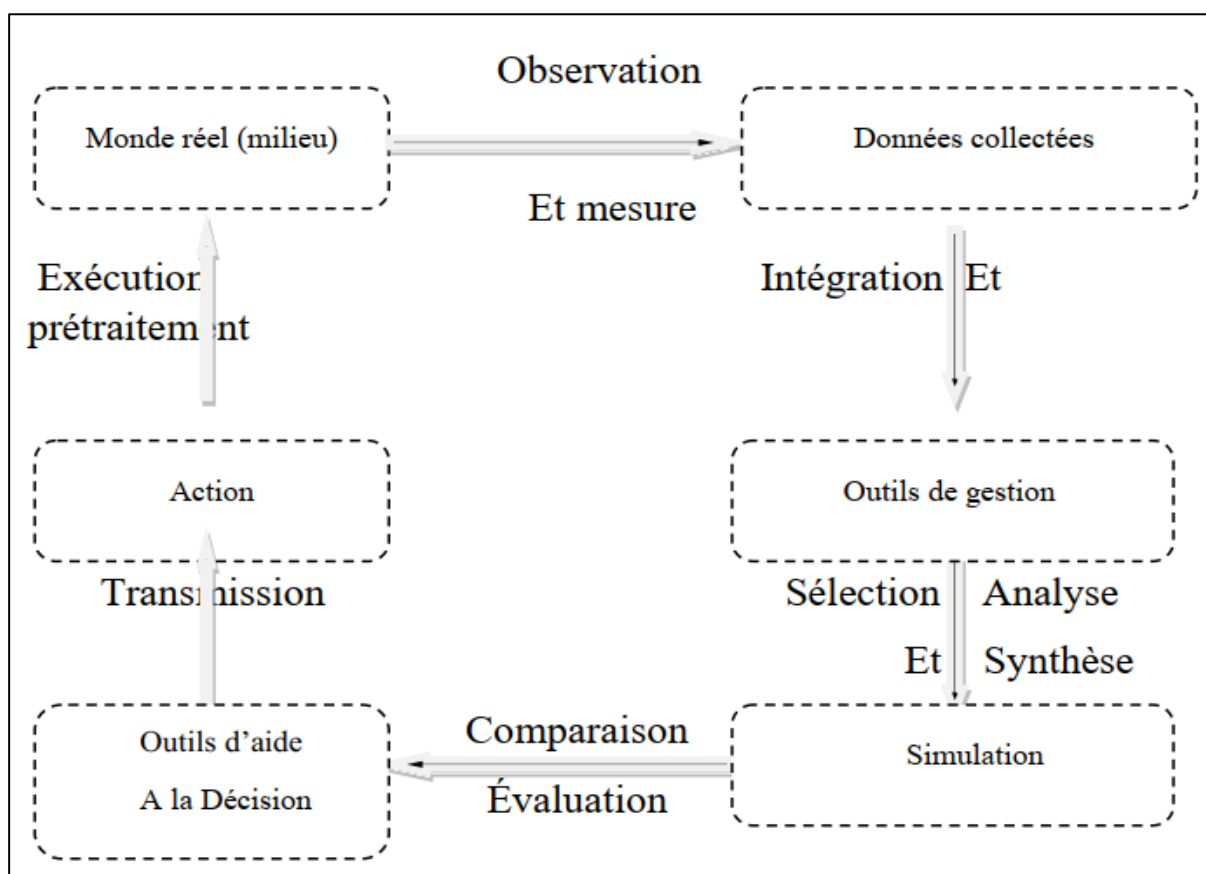
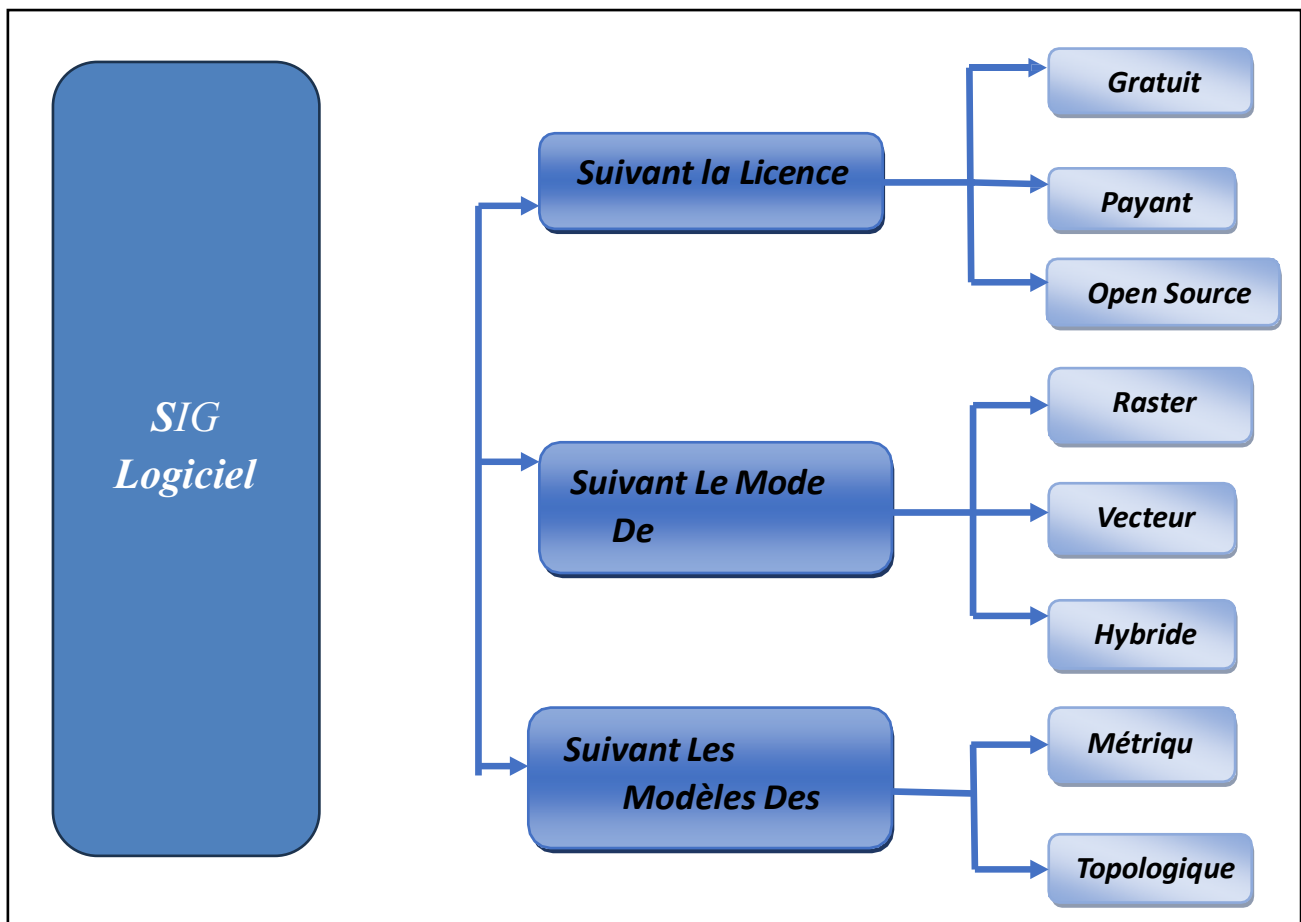


Figure I.12: Organigramme d'un SIG

### I.5.9. Classification d'un SIG logiciel

Un logiciel SIG collecte, gère, analyse et visualise des données géographiques. Il existe en versions desktop, web ou mobile, et en licences libres ou propriétaires. Il permet la superposition de couches et l'aide à la décision.[7] La figure ci-après expose une classification des logiciels SIG :



**Figure I.13:** Classification des logiciels

## **I.5.10 Les modèles d'un SIG**

### **I.5.10. Le modèle métrique**

Le modèle métrique (aussi appelé modèle spaghetti) est un modèle de données vectoriel qui représente les objets géographiques uniquement par leurs coordonnées géométriques x,y et z en 3D

#### **I.5.10.2 Modèle topologique**

Ce modèle assure la qualité des données grâce à deux niveaux de topologie :

**Topologie de réseau :** décrit les relations entre polylignes via leurs nœuds (départ/arrivée), définissant la connectivité et le sens entre arcs ;

**Topologie de voisinage :** identifie les polygones adjacents à partir des arcs qui les composent.[7]

### I.5.11. Les données d'un SIG et leurs types

Un SIG doit répondre à plusieurs conditions et critères, de ce fait il est nécessairement de trouver, trier et sélectionner des données spécifiques pour atteindre le but.

- **Multi-Données :**

Le tableau I.1 présente les différents types de multi données ainsi que leur description :[7]

**Le tableau I.1 :** Présentation des principaux types de multi données

| Type de multi-données   | Description  | Objectives / Applications  |
|-------------------------|--|--|
| <b>Multi-échelles</b>   | Permet d'observer un territoire à différents niveaux de détail (du global au local) grâce au zoom et à l'analyse spatiale. | Vision globale et détaillée simultanée, aide à la prise de décision.                       |
| <b>Multi-résolution</b> | Utilisation d'images de différentes résolutions, facilitant la mosaïque d'images et l'adaptation du niveau de précision.   | Optimisation du stockage, gestion efficace de l'espace et abstraction des zones d'intérêt. |
| <b>Multi-dates</b>      | Intégration de données acquises à différentes périodes.  | Analyse temporelle, suivi de l'évolution et détection des changements.                     |
| <b>Multi-source</b>     | Combinaison de données provenant de différentes sources et formats.  | Amélioration de la fiabilité, validation, enrichissement et cohérence des données.         |

- **La métadonnée :**

Données d'une donnée, cet-à-dire l'information sur le producteur et la donnée, ses conditions de création ou de diffusion (interdiction, restriction, accès libre) sa qualité, son extension géographique.

- **La qualité sur la donnée :** la visibilité, lisibilité, sélectivité, fiabilité, précision et exactitude.[7]

## **I.5.12. Domaines application des SIG**

Un SIG est à la fois un outil de gestion pour le technicien (gestion quotidienne d'une activité) et un outil d'aide à la décision pour le décideur (directeur, administrateur) qui utilise des cartes de synthèse pour prendre les meilleures décisions. Cette finalité justifie le terme « système d'information » et définit les domaines d'application suivant [7]

### **I.5.12.1 Grandes échelles :**

- **Gestion foncière et cadastrale :** recensement des propriétés, calcul de surfaces
- **Planification urbaine :** plan d'occupation des sols, aménagement du territoire
- **Gestion des transports :** voies de circulation, signalisation routière
- **Gestion des réseaux :** assainissement, eau potable (AEP), gaz, électricité, télécommunications
- **Gestion du patrimoine :** espaces verts, parcs, jardins
- **Applications topographiques :** travaux publics, génie civil

### **I.5.12.2 Échelles moyennes et petites**

- **Études d'impact :** implantation de centres commerciaux, d'écoles
- **Ingénierie routière :** construction de routes et autoroutes
- **Sécurité civil :** prévention des risques naturels et technologiques
- **Gestion des ressources naturelles :** protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques, hydrographiques

## **I.5.13. Les différents types des modèles des données géographiques :**

Un SIG utilise deux modèles de données : le vectoriel (points, lignes, polygones par coordonnées, pour objets discrets) et le raster (grille de cellules, pour phénomènes continus). Le choix dépend des besoins analytiques et de l'échelle.[7], les données dans un SIG sont structurées sous formes de couches comme illustré dans la figure I.14 suivante :

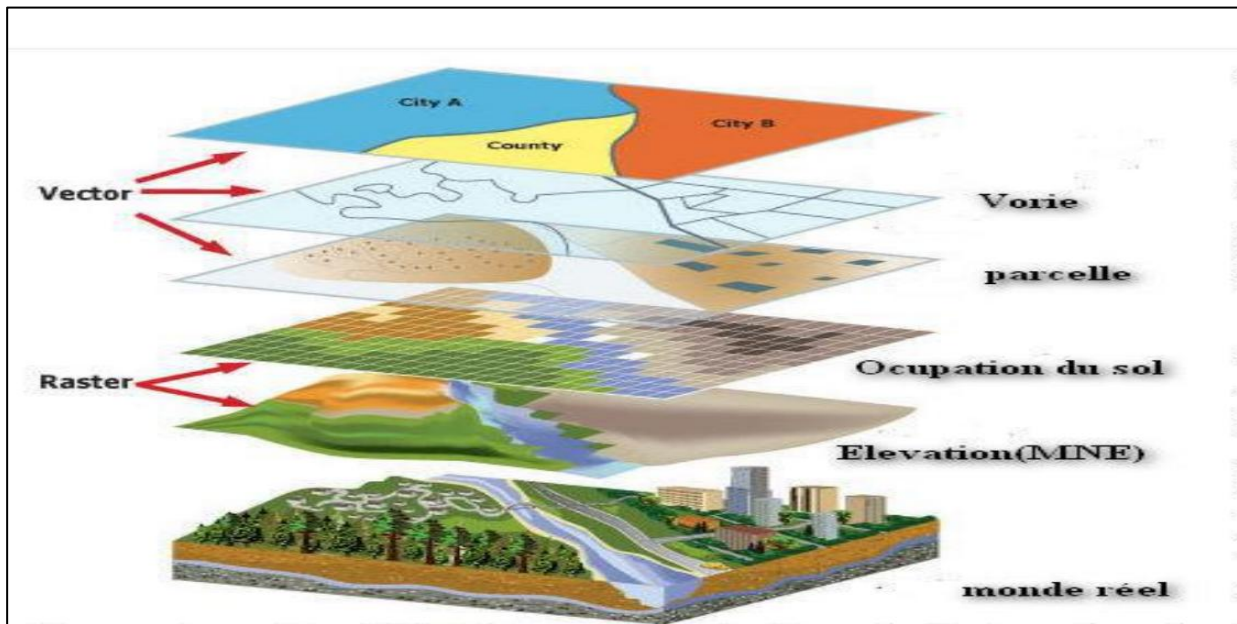


Figure I.14 : Les données géométriques d'un SIG.

### I.5.14. Les disciplines liées au SIG

Un SIG demande des disciplines qui sont inévitable (télédétection, cartographie automatique, base des données, dessin assisté par ordinateur).[7]

**Télédétection** : l'ensemble des procédés et techniques qui permettent d'acquérir à distance des informations sur les objets terrestres.

**Cartographie automatique** : une technique avancée de la cartographie avec l'utilisation de la télédétection dans le but de réaliser des cartes géographiques et géologiques

**Dessin assisté par ordinateur** : DAO est une discipline permettant de produire des dessins techniques avec des logiciels informatique.

**Base de données** : c'est un outil permettant de stocker et retrouver l'intégralité de données brutes ou d'informations en rapport avec un thème ou une activité ; celles-ci peuvent être de nature différente et plus ou moins reliées entre elles.

### I.5.15.2 Système de coordonnées et projection :

Afin de permettre la superposition correcte des différentes couches d'information dans un SIG, il est essentiel d'assurer un géoréférencement précis et rigoureux de chaque couche thématique. Cela implique l'utilisation d'un système de coordonnées approprié et adapté,

garantissant la cohérence spatiale des données.[7]

### I.5.15.1 Les coordonnées géographiques et coordonnées projetées

Les coordonnées d'un objet géographiques sont exprimées essentiellement sous deux formes quel que soit le système de coordonnées. [7]

a) **Système de coordonnées géographiques SCG** : Les coordonnées géographiques utilisent une surface sphérique pour localiser un point sur la Terre à l'aide de la latitude et de la longitude, exprimées en degrés et définies par rapport au méridien de Greenwich et à l'Équateur, comme montré dans la figure I.15 ci-dessous :

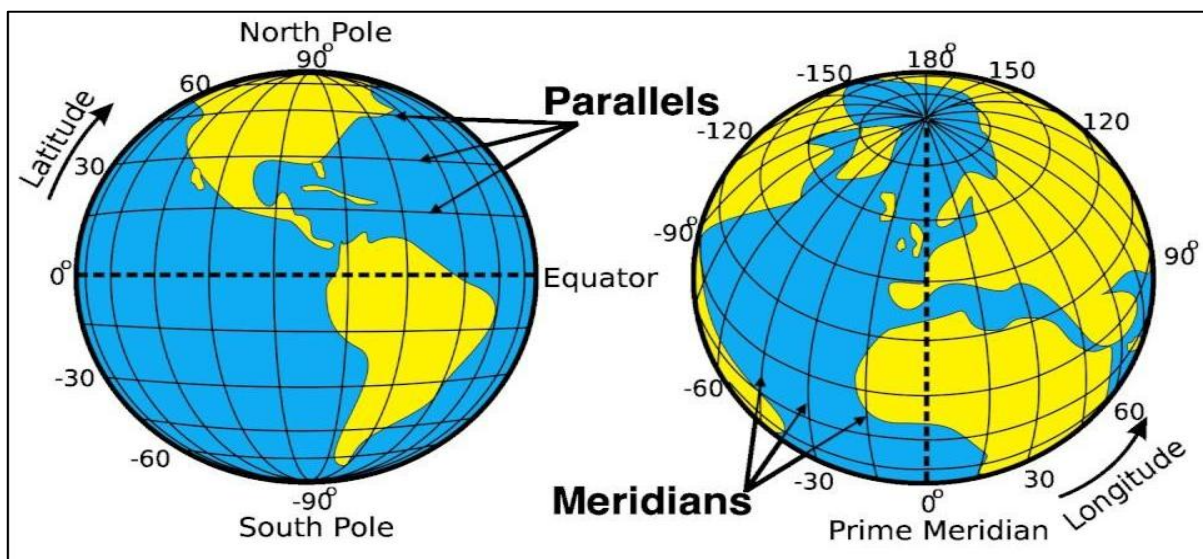


Figure I.15: Système de coordonnées géographiques.

b) **Système de coordonnées projetées SCP** : qui utilise une représentation plate (à 2 dimensions) pour déterminer la position sur la terre à l'aide de coordonnées « x,y » linéaires (des mètres par exemple) d'une grille ayant une origine propre au système, une illustration des deux systèmes est montrée dans la figure I.16 :



**Figure I.16:** Systèmes de coordonnées projetées *SCP*

### **I.5.15.2 Système international WGS84 :**

Le **WGS 84** est le système géodésique mondial standard utilisé par le GPS pour définir les coordonnées géographiques. Il repose sur un ellipsoïde de référence centré sur la masse terrestre et utilise le méridien de Greenwich comme référence. Ce système est largement employé en navigation, en cartographie et dans les SIG. Les valeurs de longitude s'étendent de  $-180^{\circ}$  à  $+180^{\circ}$ , et celles de latitude de  $-90^{\circ}$  à  $+90^{\circ}$ . Malgré son origine en 1984, il a été régulièrement ajusté pour améliorer sa précision et se rapproche aujourd'hui de l'ITRF.[7]

**Remarque :** « Les données géographiques ont été stockées dans le système de coordonnées géographiques GCS WGS 1984 (EPSG :4326), qui constitue l'un des systèmes de référence les plus utilisés pour l'échange et l'interopérabilité des données spatiales. ».

### **I.5.15.3 Système national de projection :**

En Afrique, le système cartographique de l'IGN était fondé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880, adopté à la suite des recommandations formulées lors de la Conférence internationale d'Eukavu, tenue au Congo-Zaïre en 1953. [7]

### **I.5.15.4. Projection Lambert Nord-Algérie et Sud-Algérie :**

C'est une projection conique conforme tangente de Lambert dans le but de minimiser les déformations qui est établie depuis la période coloniale.[7]

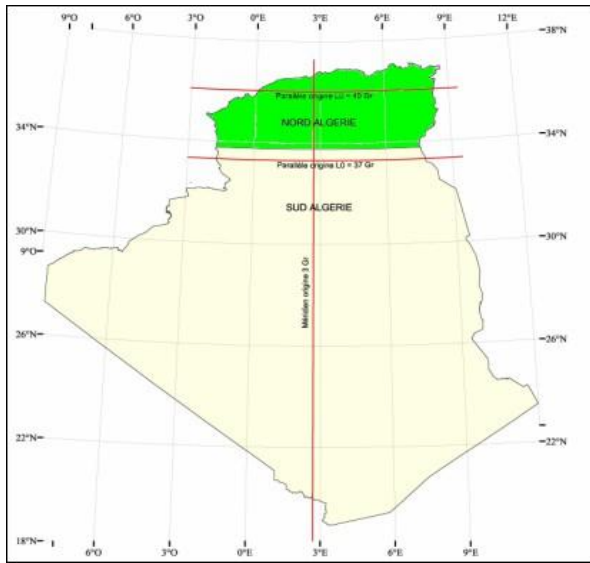


Figure I.17 : Projection Lambert Algérie

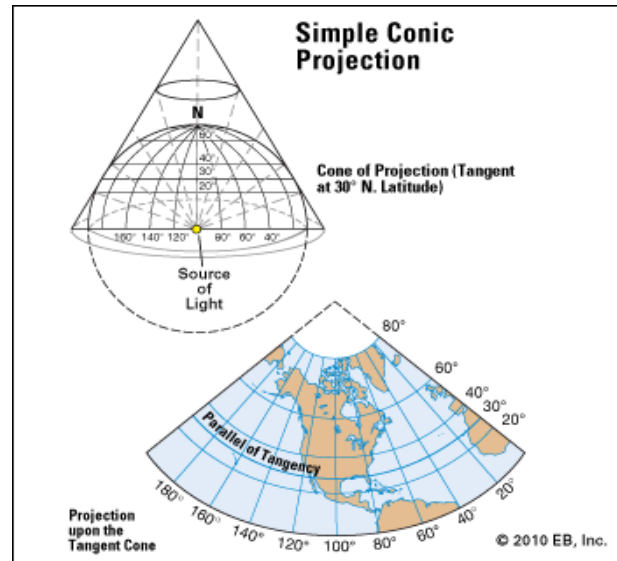


Figure I.18: projection de Lambert

### I.5.15.5 UTM de l'Algérie

L'Algérie s'étale de l'Ouest à l'Est sur quatre fuseaux : le 29, 30, 31 et 32 soit de 9° à l'Ouest du méridien d'origine et à 12° à l'Est du méridien d'origine [7]

## I.6 LA GÉODATABASE

Une géodatabase est une base de données ou une organisation de fichiers conçue pour stocker, interroger et manipuler des données spatiales. Elle conserve la géométrie, le système de référence spatiale, les attributs et les règles de gestion associées aux données. Divers jeux de données y coexistent : classes d'entités, tables attributaires, rasters, topologies, etc. Une géodatabase peut être implémentée soit dans un système de gestion de base de données relationnelle, soit sous la forme d'un ensemble de fichiers « géodatabase fichier » [7]

### I.6.1 Types de géodatabases

Il existe quatre types de géodatabases :

**I.6.1.1 Géodatabases fichier** : est le type de géodatabase le plus utilisé, surtout pour les utilisateurs individuels et les petites équipes travaillant sur des applications SIG de bureau comme ArcGIS Desktop ou ArcGIS Pro. Elle est stockée sous forme d'un dossier avec l'extension Gdb, contenant plusieurs fichiers binaires.

Son architecture permet un stockage efficace, une manipulation facile (copie, déplacement, sauvegarde) et une bonne organisation des données, chaque jeu de données étant enregistré séparément. Elle utilise une compression avancée pouvant réduire l'espace de stockage jusqu'à 70 % sans perte de performance.

En termes de capacité, elle peut gérer des datasets allant jusqu'à 1 To, avec un nombre illimité de couches. Elle offre de bonnes performances grâce à l'indexation spatiale automatique et à l'optimisation des requêtes.

Concernant le partage, elle peut être facilement transférée (clé USB, cloud, etc.) et permet la réplication des données pour travailler sur plusieurs copies.

Cependant, elle présente des limites : elle ne permet pas l'édition simultanée par plusieurs utilisateurs et ne dispose pas des fonctionnalités avancées des géodatabases d'entreprise (gestion multi-utilisateurs, versionnement, etc.).[9]

**I.6.1.2 Géodatabase d'Entreprise** : La géodatabase d'entreprise, hébergée sur des SGBD (SQL Server, Oracle, PostgreSQL, Db2), est conçue pour les environnements multi-utilisateurs et les applications à grande échelle. Elle assure sécurité, sauvegarde, réplication et optimisation des performances, prend en charge le versionnement pour l'édition concurrente sans conflit et fournit des outils d'administration et une forte scalabilité [7]

**I.6.1.3 Geodatabases mobile** La géodatabase mobile, destinée à la collecte terrain hors ligne (ex. ArcGIS Field Maps), gère des données spatiales sans connexion tout en conservant modèles complexes et validation topologique. Elle garantit l'intégrité des données hors ligne, permet la synchronisation ultérieure avec des géodatabases fichier ou d'entreprise et intègre des mécanismes de résolution de conflits. Optimisée pour appareils mobiles, elle prend en compte stockage, performances et autonomie et exploite GPS, caméra et écran tactile pour faciliter la saisie sur le terrain [7]

**I.6.1.4 Personal Geodatabase** : est un ancien type de géodatabase basé sur le format Microsoft Access (.mdb), utilisé principalement avec ArcGIS Desktop. Elle permet le stockage et la gestion de données spatiales dans un environnement simple et intégré.

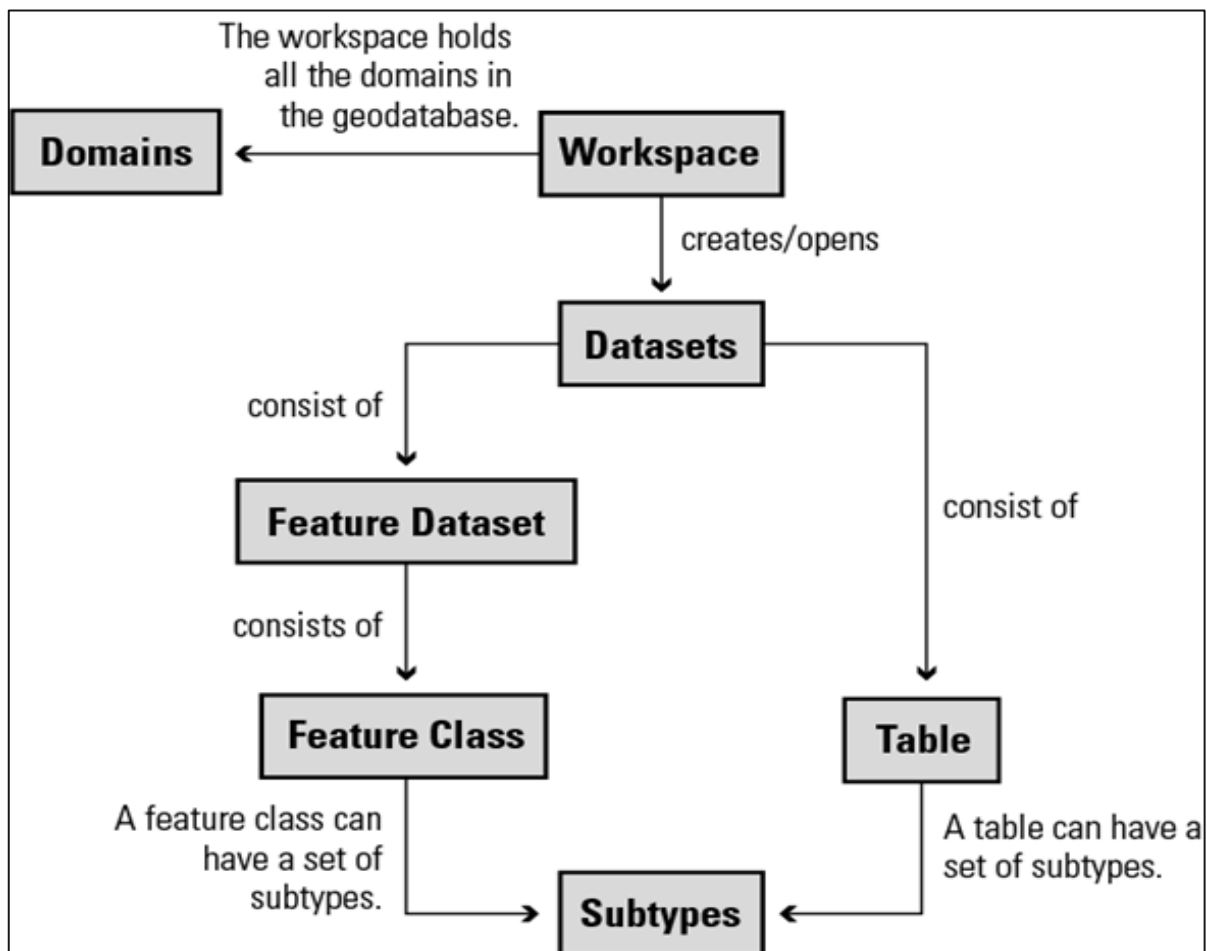
Elle est limitée à une capacité maximale d'environ **2 Go**, ce qui restreint son utilisation aux petits projets. Elle supporte un accès multi-utilisateur très limité (principalement en lecture), sans véritable gestion avancée des accès ou du versionnement.[7]

## **I.6.2 Structure d'une géodatabase**

- **Classes d'entités (Feature Classes)** : collections d'objets géographiques homogènes (points, lignes ou polygones) partageant les mêmes attributs.
- **Tables attributaires** : tables de données non spatiales (type Excel/Access) contenant des informations descriptives, liées ou non à des entités spatiales.
- **Jeux de données raster** : stockent images satellites, photos aériennes et modèles numériques de terrain (MNT).

### Organisation et structuration avancée

- **Jeux de classes d'entités (Feature Datasets)** : conteneurs regroupant des classes d'entités avec le même système de coordonnées, indispensables pour créer topologies et réseaux,[10] le modèle d'une structure d'une géodatabase est présenté dans la figure I.19 ci-après :



**Figure I.19:** Modèle structurel d'une géodatabase SIG

### I.6.3 Gestion des relations et des règles topologiques

La gestion des relations et des règles topologiques est fondamentale dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour garantir l'intégrité spatiale et la cohérence des données géographiques. Ces règles définissent comment les entités (points, lignes, polygones) partagent leur géométrie et interagissent entre elle [10]

#### I.6.3.1 Concepts Fondamentaux

- ❖ **Topologie** : Étude des relations spatiales qui restent invariables sous certaines transformations (connexion, contiguïté, inclusion).
- ❖ **Relations Topologiques** : Relations de base telles que : *Disjoint*, *Touche (Touch)*, *Contient (Contains)*, *Égal (Equal)*, *Superposition (Overlap)*, *Limite (Boundary)*.
- ❖ **Modélisation** : La topologie dans une géodatabase (ex : ArcGIS) permet de structurer les données pour modéliser des relations complexes.

#### I.6.3.2 Règles Topologiques Communes (SIG)

Les règles sont appliquées pour éviter les erreurs de saisie :[9]

- ❖ **Polygones** : Ne doivent pas se superposer (Overlap), ne doivent pas avoir de lacunes (Gaps), doivent être recouverts par une autre couche.
- ❖ **Lignes** : Ne doivent pas avoir de nœuds pendants (Dangles), ne doivent pas se croiser, doivent être fermées.
- ❖ **Points** : Doivent être couverts par des lignes ou des polygones.

#### I.6.3.3 Gestion et Validation

- ❖ **Validation** : Une fois les règles définies, la topologie doit être validée pour détecter les erreurs (violations).
- ❖ **Correction** : Les SIG proposent des outils pour corriger automatiquement ou manuellement les erreurs topologiques.
- ❖ **Mise à jour** : Les relations topologiques doivent être maintenues lors de la mise à jour (migration) des données.

## I.7 AUSCULTATION DES CHAUSSEES ROUTIERES

L'auscultation des chaussées routières est le processus complet d'évaluation de l'état de santé d'une route, permettant d'établir un diagnostic précis pour déterminer les travaux d'entretien ou de réhabilitation nécessaires et maintenir un niveau de service acceptable [9]

### **I.7.1 Limites des approches actuelles**

Bien que les méthodes d'auscultation routière aient connu une évolution significative, depuis les inspections visuelles jusqu'aux systèmes automatisés intégrant l'intelligence artificielle et la télédétection, leur mise en œuvre demeure confrontée à plusieurs défis. Parmi ceux-ci figurent le coût important des équipements, la complexité des traitements de données et les exigences techniques liées à leur exploitation. Dans ce contexte, le recours à des solutions SIG intelligentes et structurées apparaît comme une alternative pertinente pour améliorer l'organisation, l'analyse et la gestion durable des données relatives aux infrastructures routières [10]

#### **I.7.1.1 Limites des méthodes d'auscultation traditionnelles :**

Les méthodes traditionnelles reposent principalement sur des inspections visuelles réalisées sur terrain par des opérateurs. Cette approche présente plusieurs contraintes :

- Temps d'acquisition élevé
- Forte dépendance à l'expertise humaine
- Subjectivité dans l'évaluation des dégradations
- Risque d'erreurs de saisie
- Difficulté de mise à jour continue des données
- Absence d'automatisation des traitements

De plus, la gestion des informations collectées reste souvent peu structurée et difficile à exploiter dans le cadre de l'aide à la décision. Afin d'enrichir cette étude, une méthode réelle d'auscultation classique, encore utilisée et approuvée jusqu'à présent, a été prise en considération. Les résultats obtenus à partir de cette approche sont présentés dans la figure I.20 ci-dessous :[11]

| DEGRADATION DE LA CHAUSSEE                               |                                    |               |        |        |        |        |                  |        |        |        |        |        |        |        |
|--|------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Wilaya: Mostaganem                                       |                                    | Route: RN 11A |        |        |        |        | Date: 19-04-2022 |        |        |        |        |        |        |        |
| Subdivision: Mostaganem                                  |                                    | Classe        |        |        |        |        | Page N°: 01      |        |        |        |        |        |        |        |
| REPERAGE/PK DEBUT-PK FIN 2+250                           |                                    | 00+000        | 00+200 | 00+400 | 00+600 | 00+800 | 01+000           | 01+200 | 01+400 | 01+600 | 01+800 | 02+000 | 02+200 | 02+500 |
| D<br>E<br>G<br>R<br>A<br>D<br>A<br>T<br>I<br>O<br>N<br>S | SURFACE DE FISSURATION LARGES (m2) | 100           | 120    | 150    | 150    | 150    | 100              | 100    | 150    | 100    | 100    | 150    | 150    | 200    |
|  | SURFACE DE FISSURATION FINES (m2)  | 80            | 100    | 100    | 100    | 110    | /                | /      | 80     | 100    | 100    | 100    | 100    | 150    |
|  | SURFACE DES ARRACHEMENTS (m2)      | 0             | 60     | 70     | 60     | 60     | /                | /      | /      | /      | /      | /      | /      | 70     |
|  | NIDS DE POULES (nbre)              | 2             | 6      | 4      | 2      | /      | 2                | /      | /      | /      | /      | /      | /      | 2      |
|  | SURFACE DES EPAUFRURES (m2)        | /             | /      | /      | /      | /      | /                | /      | /      | /      | /      | /      | /      | /      |
|  | PROFONDEUR DES ORNIERES (mm)       | /             | /      | /      | /      | /      | /                | /      | /      | /      | /      | /      | /      | /      |

| DEGRADATION DE LA CHAUSSEE                               |                                    |               |        |        |        |        |                  |        |  |  |  |  |  |  |
|--|------------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--|--|--|--|--|--|
| Wilaya: Mostaganem                                       |                                    | Route: RN 11A |        |        |        |        | Date: 19-04-2022 |        |  |  |  |  |  |  |
| Subdivision: Mostaganem                                  |                                    | Classe        |        |        |        |        | Page N°: 02      |        |  |  |  |  |  |  |
| REPARAGE/PK DEBUT-PK FIN 6+300                           |                                    | 05+100        | 05+300 | 05+500 | 05+700 | 05+900 | 06+100           | 06+300 |  |  |  |  |  |  |
| D<br>E<br>G<br>R<br>A<br>D<br>A<br>T<br>I<br>O<br>N<br>S | SURFACE DE FISSURATION LARGES (m2) | 250           | 200    | 150    | 200    | 200    | 250              | 300    |  |  |  |  |  |  |
|  | SURFACE DE FISSURATION FINES (m2)  | 200           | 250    | 150    | 150    | 150    | 250              | 250    |  |  |  |  |  |  |
|  | SURFACE DES ARRACHEMENTS (m2)      | 80            | 60     | 50     | 50     | 50     | 50               | 60     |  |  |  |  |  |  |
|  | NIDS DE POULES (nbre)              | 2             | 3      | 2      | /      | /      | /                | 4      |  |  |  |  |  |  |
|  | SURFACE DES EPAUFRURES (m2)        | /             | /      | /      | /      | /      | /                | /      |  |  |  |  |  |  |
|  | PROFONDEUR DES ORNIERES (mm)       | /             | /      | /      | /      | /      | /                | /      |  |  |  |  |  |  |

**Figure I.20:** Fiche d'auscultation classique des dégradations de chaussée sur la route nationale RN11A (wilaya de Mostaganem)

### I.7.1.2 Limites des systèmes d'auscultation avancés :

Les méthodes avancées d'auscultation routière utilisent des technologies de pointe (lasers 3D, caméras haute résolution, radar, ultrasons) pour cartographier et analyser l'état des chaussées avec une précision millimétrique, souvent en une seule passe à haute vitesse. Ces techniques automatisées, comme la méthode GRD (Gestion Routière Durable), permettent

d'identifier les dégradations (fissures, orniéage) et de caractériser la structure (épaisseur, portance) de manière prédictive pour optimiser l'entretien.[10]

En Algérie, l'auscultation routière est assurée par plusieurs organismes spécialisés, notamment le Centre des Techniques et Technologies de la Production (CTTP) et le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (LTPO). Ces organismes utilisent des équipements modernes et performants pour l'évaluation de l'état des chaussées. Parmi les technologies les plus avancées figure le système laser *LCMS-2 (Laser Crack Measurement System)*, intégré aux véhicules d'auscultation automatisés. Ce système permet de collecter des données précises, numériques et rapidement exploitables concernant les dégradations routières et les caractéristiques de surface des chaussées.[11]

La figure I.21 ci-dessous présente cet équipement développé et exploité par le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest dans le cadre des opérations d'auscultation routière en Algérie :



**Figure I.21** : Véhicule d'auscultation routière automatisé « SCANROAD »

Cependant, malgré leurs performances élevées et la qualité des données produites, ces systèmes présentent plusieurs limites :[11]

Cependant, malgré leur précision et leur efficacité dans la collecte et l'analyse des données routières, ces systèmes demeurent confrontés à plusieurs contraintes limitant leur adoption à grande échelle [11] :

- Investissement financier important lié à l'acquisition des équipements spécialisés ;
- Recours à des véhicules d'auscultation dédiés et à des infrastructures techniques spécifiques ;
- Exigences élevées en matière de maintenance et de gestion des équipements ;
- Nécessité de disposer de compétences techniques avancées pour l'exploitation et l'interprétation des données ;
- Besoins importants en ressources matérielles et logicielles pour le traitement des informations collectées ;
- Accessibilité limitée pour les organismes et collectivités disposant de budgets restreints.

L'ensemble de ces contraintes constitue un frein à la généralisation de ces solutions, notamment au sein des collectivités locales, des organismes de gestion routière à ressources limitées et dans le cadre des projets académiques. Cette situation met en évidence l'intérêt de développer des approches alternatives reposant sur des outils SIG intelligents, structurés et économiquement accessibles, capables de répondre aux besoins de gestion et de suivi des infrastructures routières tout en réduisant les coûts de mise en œuvre.

## **I.8 POSITIONNEMENT DU PROJET PROPOSE :**

Afin de répondre aux limites des approches conventionnelles d'auscultation routière, ce projet propose le développement d'une solution SIG reposant sur :

- Une géodatabase structurée dédiée à l'inventaire et à la gestion des dégradations routières ;
- L'utilisation de la plateforme ArcGIS Pro pour le stockage, l'analyse et la visualisation des données ;
- L'intégration d'images géoréférencées comme support à l'identification et à la localisation des dégradations ;
- Le recours à des équipements accessibles, tels que les smartphones et les véhicules légers, pour l'acquisition des données ;

- Une architecture évolutive permettant l'intégration future de techniques d'intelligence artificielle, de vision par ordinateur et de modélisation 3D.

Face aux contraintes techniques et financières associées aux systèmes d'auscultation routière traditionnels, cette étude vise à concevoir une solution plus flexible et économiquement accessible pour l'inventaire, l'organisation et l'exploitation des données relatives aux dégradations des chaussées. L'approche proposée s'appuie sur une structuration rigoureuse des données au sein d'une géodatabase intelligente, facilitant leur consultation, leur mise à jour et leur analyse dans un environnement SIG.

L'objectif est de mettre à disposition un outil d'aide à la décision adapté aux besoins des gestionnaires routiers, tout en restant accessible aux collectivités locales, aux bureaux d'études et aux projets académiques disposant de ressources matérielles et financières limitées. Par ailleurs, l'architecture développée constitue une base évolutive pouvant accueillir ultérieurement des modules automatisés de détection et d'analyse des dégradations fondés sur l'intelligence artificielle.

## **I.9 POSITIONNEMENT IA/ 3D**

L'Intelligence Artificielle (IA) et les technologies de modélisation 3D représentent aujourd'hui des axes de développement prometteurs dans le domaine de l'auscultation et de la gestion des infrastructures routières. Grâce aux progrès récents de la vision par ordinateur, de l'apprentissage automatique et des techniques de reconstruction tridimensionnelle, il devient possible d'automatiser l'identification, la caractérisation et le suivi des dégradations routières à partir d'images et de données géospatiales.

Les approches basées sur l'IA permettent notamment d'améliorer les processus de détection, d'extraction et de classification des dégradations, tandis que les modèles 3D offrent une représentation détaillée de l'état des chaussées, facilitant l'analyse géométrique et l'évaluation de leur niveau de détérioration. Ces technologies constituent ainsi des outils d'aide à la décision particulièrement intéressants pour la planification des opérations d'entretien et de maintenance routière [12], [13], [30].

Dans le cadre du présent projet, l'implémentation de méthodes d'intelligence artificielle ou de modélisation 3D ne constitue pas un objectif direct en raison des contraintes temporelles et du périmètre du travail. Toutefois, la géodatabase développée a été conçue selon une architecture évolutive permettant l'intégration future de données issues de systèmes de vision par ordinateur, de modèles d'apprentissage automatique ou de représentations

tridimensionnelles. Ainsi, la solution proposée constitue une base de données géospatiale structurée et pérenne, pouvant servir de socle à de futurs développements orientés vers l'automatisation de l'auscultation routière.

## **I.10 CONCLUSION**

Ce chapitre a permis de présenter le contexte général de l'auscultation routière ainsi que l'état de l'art relatif aux méthodes de détection, d'analyse et de gestion des dégradations des chaussées. L'étude des principales dégradations routières a mis en évidence l'importance d'un suivi régulier et structuré afin d'assurer la sécurité des usagers, d'optimiser les opérations de maintenance et de prolonger la durée de vie des infrastructures routières.[9]

L'analyse des approches actuelles a montré que les technologies modernes d'auscultation, notamment les systèmes automatisés utilisant des capteurs laser, des véhicules spécialisés et des dispositifs de numérisation avancée, offrent des résultats précis et exploitables. Toutefois, ces solutions présentent plusieurs contraintes liées au coût élevé des équipements, à la complexité de leur mise en œuvre, à la nécessité de disposer de ressources matérielles importantes ainsi qu'à l'exigence d'un personnel qualifié. Ces limitations rendent leur déploiement difficile pour les collectivités locales, les petites structures techniques et les projets académiques.

Par ailleurs, l'analyse des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des géodatabases, ainsi que des approches fondées sur l'Intelligence Artificielle, d'une part, et sur la modélisation tridimensionnelle (3D), d'autre part, met en évidence leur apport significatif dans l'optimisation des processus d'inventaire, de traitement, d'analyse et d'aide à la prise de décision.

L'intégration conjointe de ces technologies contribue non seulement à l'automatisation des tâches de détection et de classification des dégradations routières, mais également à la génération de représentations numériques précises et exploitables. Ces dernières facilitent le calcul d'indicateurs d'évaluation objectifs ainsi que la hiérarchisation des sections routières selon leur état structurel et fonctionnel.[10],[12]

Dans ce cadre, le développement d'une solution intelligente, flexible et économiquement viable apparaît comme une perspective stratégique pour améliorer la gestion et la maintenance des infrastructures routières. Cette réflexion constitue ainsi le fondement du chapitre suivant, dédié à la conception et à la structuration d'une géodatabase dédiée à l'inventaire, au suivi et à l'analyse des dégradations routières dans un environnement SIG.



A decorative border in red, resembling a scroll, frames the central text. It has rounded corners and a vertical strip on the left side.

***CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA  
GEODATABASE***

# CHAPITRE II : CONCEPTION DE LA GEODATABASE

## 1. ANALYSE DES BESOINS :

L'analyse des besoins constitue une étape fondamentale dans la conception d'une géodatabase SIG. Elle vise à identifier et à formaliser les exigences fonctionnelles et techniques du système afin de garantir que la structure de données développée réponde efficacement aux objectifs du projet. Cette phase permet notamment de déterminer les informations à gérer, les utilisateurs concernés, les traitements à réaliser ainsi que les résultats attendus.

Dans le cadre de ce projet, l'analyse des besoins a pour objectif de concevoir une géodatabase dédiée à l'inventaire, au suivi et à l'analyse des dégradations routières. La solution proposée doit permettre une gestion centralisée et cohérente des données géographiques et descriptives, tout en facilitant leur exploitation dans un environnement SIG.

Les principaux besoins identifiés sont les suivants :

- Identifier les différents acteurs et utilisateurs du système d'information géographique ;
- Centraliser les données spatiales et attributaires relatives aux infrastructures routières et à leurs dégradations ;
- Structurer et organiser les informations au sein d'une géodatabase cohérente et normalisée ;
- Faciliter la consultation, la mise à jour et la gestion des données ;
- Permettre la recherche, le filtrage et l'interrogation des objets géographiques ;
- Assurer la production de cartes thématiques et de documents cartographiques ;
- Réaliser des analyses spatiales et des traitements géographiques ;
- Réduire les redondances, les incohérences et les risques d'erreurs dans les données ;
- Garantir l'intégrité, la sécurité et la pérennité de l'information ;
- Assurer la compatibilité avec les outils et plateformes SIG utilisés ;
- Fournir un support d'aide à la décision pour la gestion et la maintenance des infrastructures routières ;
- Préparer une structure de données évolutive pouvant intégrer ultérieurement des modules d'analyse avancée, d'intelligence artificielle ou de modélisation 3D.

Ainsi, l'analyse des besoins constitue le socle de la démarche de conception adoptée dans ce travail. Elle permet de traduire les besoins métiers en exigences fonctionnelles et structurelles qui serviront de base à l'élaboration du modèle conceptuel de données (MCD), puis du modèle logique de données (MLD), avant leur implémentation au sein de la géodatabase sous ArcGIS Pro.

## II.2 MODELISATION CONCEPTUELLE DE DONNEE :

**Définition :** La modélisation conceptuelle des données constitue une étape essentielle dans la conception d'une géodatabase. Elle permet de représenter de manière structurée et indépendante de toute contrainte technique l'ensemble des informations nécessaires au fonctionnement du système d'information. Réalisée selon la méthode MERISE, cette étape vise à identifier les données à gérer, leurs caractéristiques ainsi que les liens qui les unissent.[15]

Dans le cadre de ce projet, le Modèle Conceptuel de Données (MCD) a pour objectif de décrire l'organisation des informations relatives aux infrastructures routières et aux différentes dégradations observées sur le tronçon étudié. Il constitue une représentation abstraite de la future géodatabase et sert de support à la conception des modèles logiques et physiques qui seront implémentés sous ArcGIS Pro.

Un modèle conceptuel de données est constitué de 3 éléments :

**Les entités** Les entités représentent les principaux objets du système d'information. Dans le contexte de cette étude, elles correspondent aux différents éléments nécessaires à l'inventaire et à la gestion des dégradations routières, tels que les routes, les tronçons routiers, les dégradations, les campagnes d'inspection, les images géoréférencées ou encore les intervenants. Chaque entité est définie par un ensemble de propriétés permettant de la caractériser.

**Les attributs** : Les attributs décrivent les caractéristiques associées à chaque entité. Ils permettent de stocker les informations descriptives nécessaires à l'identification et à l'analyse des objets représentés. À titre d'exemple, une dégradation peut être caractérisée par son type, sa gravité, ses dimensions, sa date d'observation et sa localisation géographique.

**Les relations** : Les relations traduisent les liens existants entre les différentes entités du système. Elles permettent de représenter les interactions et les dépendances entre les objets modélisés. Chaque relation est définie par une cardinalité précisant le nombre minimum et maximum d'occurrences pouvant être associées entre les entités concernées.

L'élaboration du MCD permet ainsi de disposer d'une vision globale et cohérente de la structure des données avant leur implémentation dans la géodatabase. Cette étape garantit une meilleure organisation de l'information, limite les redondances et constitue la base de la conception du modèle logique de données (MLD), préalable à la mise en œuvre de la géodatabase sous ArcGIS Pro.

### **II.2.1 Etapes de la conception d'un MCD :**

La conception d'un modèle conceptuel de données peut être divisé en plusieurs étapes clés, permettant de passer d'une compréhension générale des besoins en données à un schéma structuré qui les représente. Voici comment ce processus se déroule généralement : [15]

**Identifier les besoins en données** : La première étape consiste à identifier et à comprendre les besoins en données du système. Quelles sont les données à intégrer dans le système ? La réponse à cette question implique des discussions avec les parties prenantes, comme les utilisateurs finaux, les analystes métier et les développeurs [15]

**Définir les entités et les attributs** : À partir des besoins identifiés, il faut définir les entités qui seront nécessaires dans le modèle. Une entité, rappelons-le, représente un objet du monde réel ou un concept pertinent pour le système d'information, comme un client, un produit ou un événement. Pour chaque entité, les attributs, qui sont les caractéristiques ou propriétés de ces entités, sont également définis. [15]

**Établir les relations entre entités et attributs** : Après l'identification des entités, les relations entre elles sont définies pour modéliser leurs interactions, selon trois types principaux : 1 : 1, 1 : N et N : M. [15]

- **Relations un à un (1 : 1)** : Dans une relation un-à-un, une instance d'une entité est associée à une et une seule instance d'une autre entité, et vice

versa. Ce type de relation est souvent utilisé pour diviser une entité en deux pour des raisons de clarté, de sécurité des données ou de performance

- **Relations un-à-plusieurs (1 : N) :** La relation un-à-plusieurs est l'une des plus courantes dans les modèles conceptuels de données. Dans ce type de relation, une instance d'une entité peut être associée à plusieurs instances d'une autre entité, mais une instance de cette deuxième entité ne peut être liée qu'à une unique instance de la première entité

- **Relation plusieurs-à-plusieurs (N :M).** Dans une relation plusieurs-à-plusieurs, plusieurs instances d'une entité peuvent être associées à plusieurs instances d'une autre entité. Ce type de relation nécessite souvent une entité d'association supplémentaire pour gérer les instances de relation

**Produire une représentation graphique du MCD :** Enfin, le modèle conceptuel est souvent représenté sous forme graphique, à l'aide de diagrammes entité-association. Ces diagrammes permettent de visualiser facilement les entités, leurs attributs, et les relations entre elles, offrant une vue d'ensemble claire et compréhensible du modèle de données.[15]

## II.2.2 Élaboration du Modèle Conceptuel de Données

À partir des besoins identifiés précédemment, un Modèle Conceptuel de Données (MCD) a été élaboré afin de structurer les informations nécessaires à l'inventaire et à la gestion des dégradations routières. Ce modèle constitue la base de conception de la future géodatabase et permet de représenter les principales entités du système ainsi que les relations qui les relient.

Le MCD proposé s'articule autour de cinq entités principales :

**Tronçon :** représente la portion de route faisant l'objet d'un inventaire et d'un suivi des dégradations ;

**Campagne :** correspond à une opération d'inspection ou de collecte de données réalisée à une date donnée ;

**Image** : regroupe les photographies géoréférencées acquises sur le terrain et servant de support à l'identification des dégradations ;

**Dégradation** : représente les défauts observés sur la chaussée et leurs caractéristiques ;

**Type Dégradation** : permet de classifier les différentes formes de dégradations recensées.

Les relations établies entre ces entités assurent la traçabilité des observations effectuées sur le terrain. Chaque campagne est associée à un tronçon routier donné, tandis que les images acquises lors de la campagne permettent de documenter les dégradations observées. Les dégradations sont ensuite caractérisées et classifiées selon leur type afin de faciliter leur analyse et leur exploitation dans le système d'information géographique.

La figure II.1 suivante présente le Modèle Conceptuel de Données retenu pour la conception de la géodatabase :



**Figure II.1** : schéma représentatif du modèle conceptuel de donner (MCD)

### II.2.3 Analyse du MCD

L'analyse du modèle conceptuel met en évidence une organisation hiérarchique des données. Le tronçon routier constitue l'élément spatial de référence autour duquel s'organisent les campagnes d'inspection. Chaque campagne génère un ensemble d'images géoréférencées permettant de documenter l'état de la chaussée. Les dégradations identifiées à partir de ces images sont ensuite décrites selon différents attributs tels que leur gravité, leur surface et leur

description. Enfin, chaque dégradation est associée à une catégorie définie dans l'entité TypeDégradation.

Cette structuration garantit la cohérence des données, facilite leur mise à jour et permet leur exploitation ultérieure dans un environnement SIG pour des opérations de consultation, de cartographie, d'analyse spatiale et d'aide à la décision.

❖ Ce modèle a pour objectif d'offrir une vision globale de la géodatabase, sans entrer dans un niveau de détail complet dès le départ. Il reste évolutif, ce qui permet d'ajouter de nouveaux attributs ou de nouvelles couches SIG au fur et à mesure de l'avancement de la recherche et de l'évolution des besoins de travail. Cette flexibilité garantit une meilleure adaptation du modèle aux exigences du projet.

### II. 3 JUSTIFICATION DES CHOIX

Le tableau II.1 présente la justification des différentes entités, tables et attributs retenus pour la conception de la géodatabase, en précisant leur rôle et leur utilité dans la gestion des données relatives aux dégradations routières.

**Tableau. II.1 : justification des entités, tables, attributs**

| Élément         | Rôle   | Justification du choix  |
|-----------------|--|---|
| <b>TRONÇON</b>  | Représente l'unité spatiale principale du réseau routier étudié. | Toute dégradation routière doit être localisée sur un support géographique précis. Le tronçon permet de segmenter le réseau en unités homogènes et de faciliter les analyses spatiales dans le SIG. |
| <b>Campagne</b> | Représente une opération de collecte de données sur le terrain.  | Les données de dégradation sont collectées à des moments différents. La campagne permet de structurer la dimension temporelle et d'assurer la traçabilité des observations.                         |

|                         |  |   |
|-------------------------|--|---|
| <b>Image</b>            | Constitue l'unité principale d'observation visuelle.   | Les dégradations sont détectées à partir des images. L'image sert au géoréférencement, à l'annotation et à l'analyse automatique. |
| <b>Dégradation</b>      | Représente un défaut observé sur la chaussée.          | C'est l'objet métier central du système. Toutes les analyses visent à identifier, qualifier et quantifier les dégradations.       |
| <b>Type_Dégradation</b> | Définit la classification normalisée des dégradations. | Cette entité permet d'homogénéiser les données, de faciliter les statistiques et de supporter la classification IA.               |

Le tableau II.2 présente la justification des relations établies entre les différentes entités et tables de la géodatabase.

**Tableau. II 2 : Justification des relations**

| <b>Relation</b>           | <b>Cardinalité</b> | <b>Signification</b>  | <b>Justification</b>                                       |
|---------------------------|--------------------|---|--|
| <b>Tronçon — Campagne</b> | 1,1 → 1, N         | Un tronçon peut être couvert par plusieurs campagnes.<br><br>Une campagne est liée à un seul tronçon. | Cette relation permet le suivi temporel d'une zone donnée. |
| <b>Campagne — Image</b>   | 1,1 → 0, N         | Une campagne peut produire plusieurs images. Une image appartient à une seule campagne.               | Elle garantit la traçabilité des données collectées.       |
| <b>Image —</b>            | 1,1 → N,1          | Une image peut contenir   | Cette relation permet la                                   |

|                                |             |  |  |
|--------------------------------|-------------|--|--|
| <b>TypeDégradation</b>         |             | plusieurs types de dégradations.<br><br>Un type peut apparaître dans plusieurs images.                                       | classification des défauts observés.                 |
| <b>Image —<br/>Dégradation</b> | 0, N → 0, N | Une image peut contenir zéro ou plusieurs dégradations.<br><br>Une dégradation peut apparaître dans une ou plusieurs images. | Elle relie l'observation visuelle à l'objet détecté. |

## II. 4 MODELE LOGIQUE DE DONNE

Le modèle logique des données (MLD) est la suite normale du processus Merise. Son but est de nous rapprocher au plus près du modèle physique. Pour cela, nous partons du modèle conceptuel des données et nous lui enlevons les relations. Mais pas n'importe comment. Il faut en effet respecter certaines règles

Il va nous permettre de représenter les différentes données que l'on a, regroupée dans une **table**, ainsi que les relations entre elles au travers de **clés étrangères**, de **clés primaires** et de **tables de jointure**. [16] Le tableau II .1 si dessous illustre la présentation de MLD

**TableauII.3** : Présentation du modèle logique de données

| <b>Table</b>    | <b>Attributs</b>   |
|-----------------|--|
| <b>TRONCON</b>  | <b>id_troncon (PK)</b> , nom, longueur, localisation, type_route                                 |
| <b>CAMPAGNE</b> | <b>id_campagne (PK)</b> , date, operateur, conditions_meteo,<br><b>id_troncon (FK → TRONCON)</b> |

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>IMAGE</b>             | <b>id_image (PK)</b> , chemin, latitude, longitude, date_capture,<br><b>id_campagne (FK → CAMPAGNE)</b>                           |
| <b>DEGRADATION</b>       | <b>id_degradation (PK)</b> , gravite, surface, description, <b>id_image (FK → IMAGE)</b> , <b>id_type (FK → TYPE_DEGRADATION)</b> |
| <b>TYPE_ DEGRADATION</b> | <b>id_type (PK)</b> , libelle, categorie  |

À partir des cardinalités maximales de ce modèle, on peut définir le schéma logique final en appliquant les règles de transformation de Merise. Les entités deviennent des tables, les identifiants deviennent des clés primaires, et les relations sont traduites par des clés étrangères ou par une table de jointure lorsque l'association est de type plusieurs-à-plusieurs. Ce passage du modèle conceptuel au modèle logique permet d'obtenir une représentation relationnelle structurée, adaptée à l'implémentation dans une base de données.

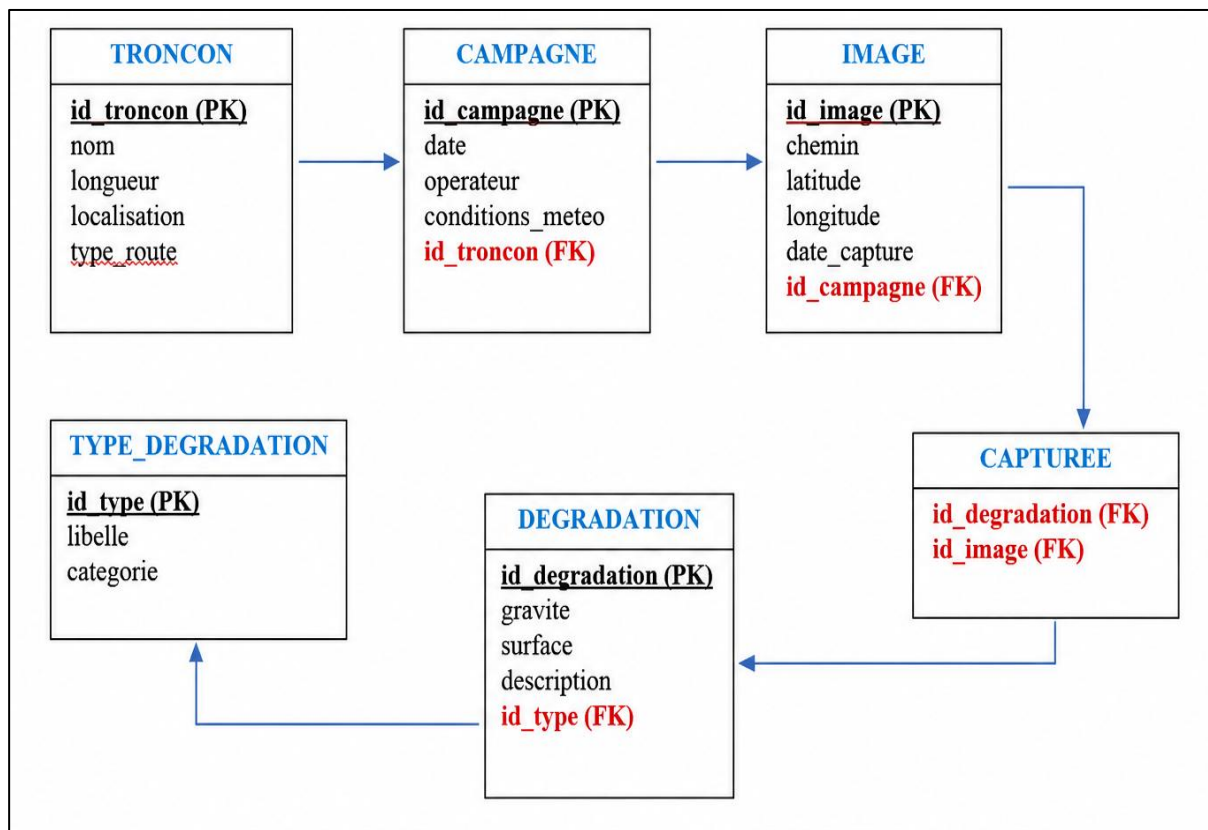
Le tableau ci-dessous présente les relations logiques définies dans le modèle logique de données (MLD), ainsi que leurs cardinalités associées

**Tableau II.4:** relations logiques

| <b>Relation</b>                   | <b>Cardinalité</b>                     |
|-----------------------------------|--|
| TRONCON—CAMPAGNE                  | 1 Tronçon → N campagnes                |
| CAMPAGNE — IMAGE                  | 1 Campagne → N images                  |
| IMAGE — DEGRADATION               | 1 Image → N dégradations               |
| TYPE_ DEGRADATION—<br>DEGRADATION | 1 Type de dégradation → N dégradations |

**Tableau II.4:** relations logiques

Finalement, à l'issue de l'ensemble des procédures et des étapes précédemment décrites, le schéma logique suivant a été obtenu. Il représente la structure logique de la base de données ainsi que les relations établies entre les différentes tables. Comme montre la Figure II .2 suivante:



**Figure II .2** : schéma représentatif du modèle logique de donner (MLD)

## II.5.2 IMPLEMENTATION ARCGIS PRO (MODEL PHYSIQUE DE DONNE)

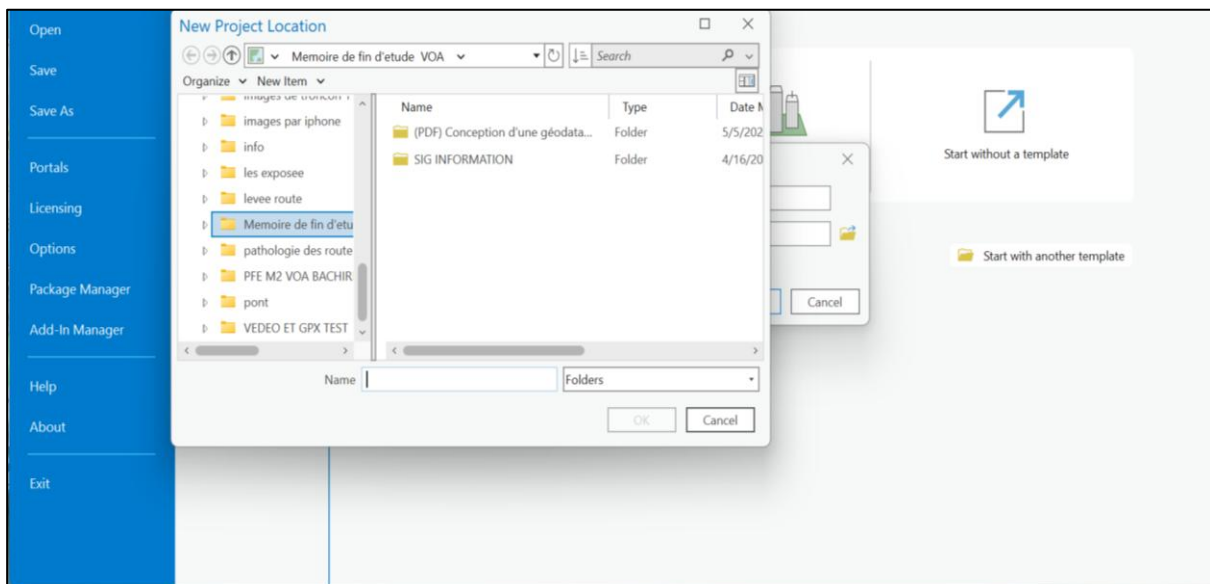
Le Modèle Physique des Données (MPD) se concrétise entièrement dans **ArcGIS Pro** via le Catalogue, principale interface graphique de gestion des géodatabases qui matérialise directement les spécifications issues du MCD (Modèle Conceptuel de Données) et du MLD (Modèle Logique de Données) sous forme d'objets physiques exploitables : File Geodatabase (.gdb) et Feature Dataset \_Projet.

### II.5.1 Conception du géodatabase selon une approche conventionnelle sous ArcGIS Pro

#### II.5.1.1 Création pratique dans ArcGIS Pro :

a) **Création d'un geodatabase** : Nouvelle géodatabase : Catalogue > clic droit Dossier > Nouvelle > Géodatabase fichier > « SIG GEODATABASE OF FINEL PROJECT ». Gdb

Puis sélectionner le dossier d'enregistrement afin de sauvegarder le projet. Come illustre la figure Figure II.3 ci-dessous :



**Figure II.3** : création et enregistrement d'un geodatabase fichier

**Création de MPD** : Clic droit « projet ». Gdb > Nouveau > Jeu de données d'entités « feature dataset ».

Dans la fenêtre de création, sélectionnez le système de coordonnées approprié, Selon le contexte géographique de l'étude, réalisée dans la wilaya de Mostaganem (Nord de l'Algérie,

latitudes 35°-36°30'N), nous sélectionnons le système de coordonnées :

WGS 84 / UTM zone 31N (EPSG :32631)

Ellipsoïde : WGS 1984

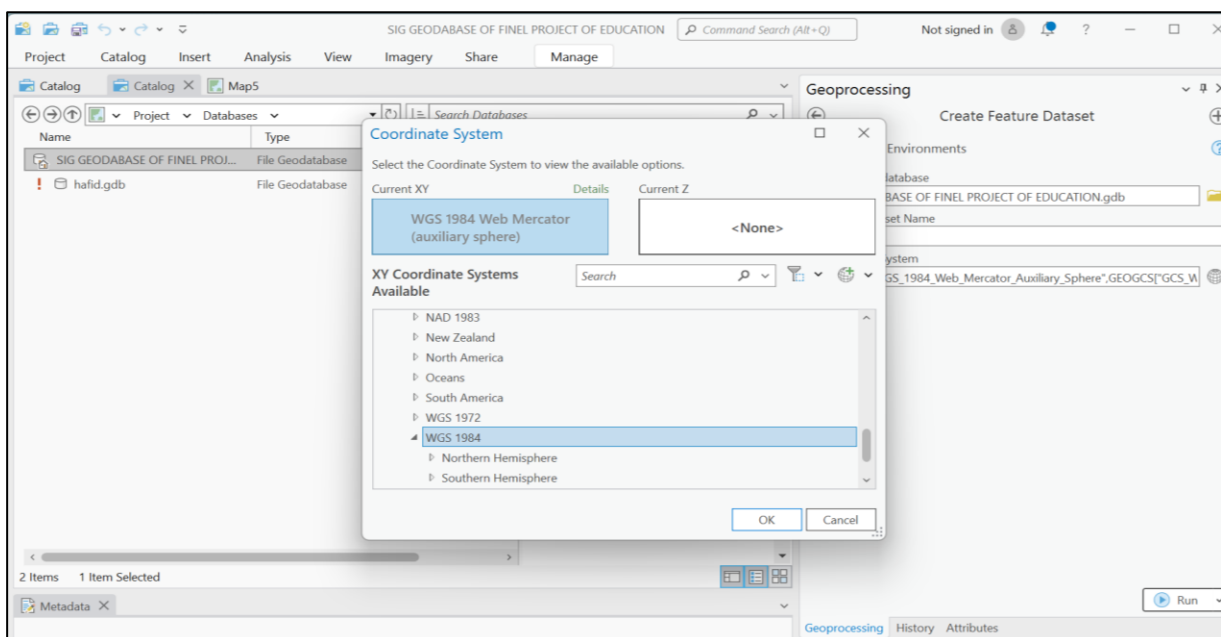
Zone UTM : 31 Nord (6°E à 12°E)

Unités : mètres

Datum : WGS 1984

Ce choix garantit l'homogénéité spatiale de toutes les classes d'entités (tronçons, image... etc.) et la validité des règles topologiques inter-classes dans le contexte géographique précis de la wilaya de Mostaganem.

La figure II.4 présente le système de coordonnées retenu pour le projet :



**Figure II .4 : choix de système de cordonné**

**b) Une (classe d'entités) Feature Class :** Une classe d'entités (feature class) est un ensemble de données géographiques (points, lignes ou polygones) partageant le même type de géométrie et la même structure attributaire. Elle joue un rôle central dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG), notamment dans les environnements ArcGIS, où elle permet de stocker à la fois la forme spatiale des objets (géométrie) et leurs propriétés attributaires sous forme de table attributaire. [8] Dans le cadre de ce projet, deux classes d'entités ont été créées et intégrées à la géodatabase :

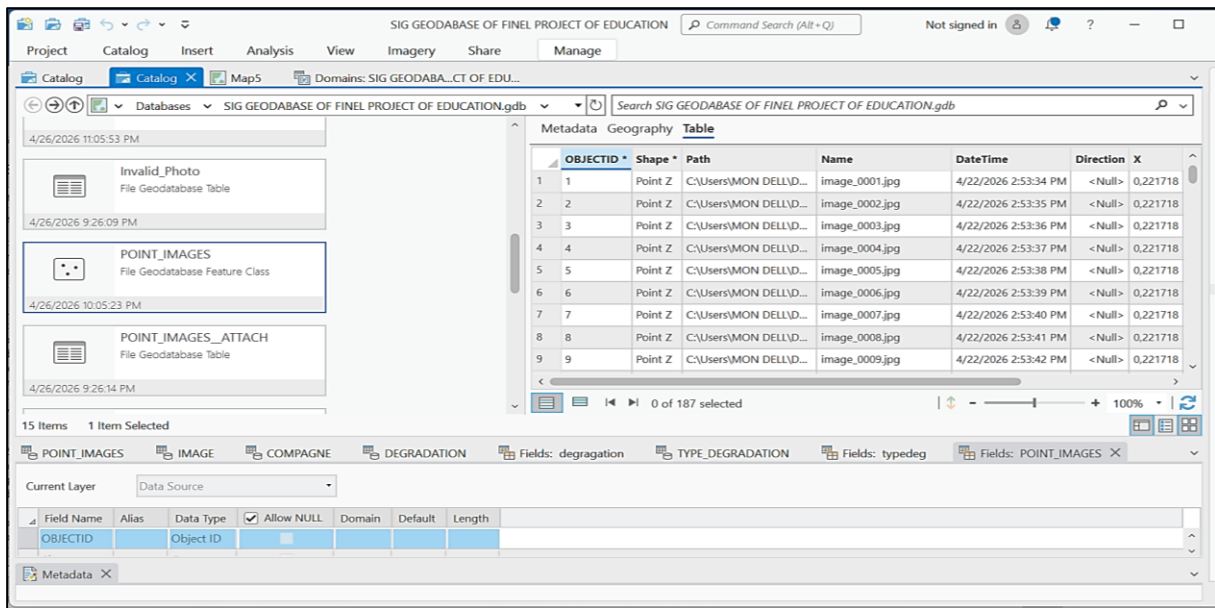
**Tronçons :** Cette classe d'entités linéaires regroupe le tronçon routier objet de l'étude ainsi qu'une section du chemin de wilaya n° 3 (CW3), située entre les intersections avec les chemins de wilaya CW24 et CW42, sur le territoire de la commune de Khier Eddine, dans la

wilaya de Mostaganem. Elle permet de représenter le réseau routier concerné et de renseigner les caractéristiques géométriques, techniques et fonctionnelles du tronçon étudié, constituant ainsi le support principal des analyses spatiales réalisées. La figure II.4 expose le tronçon objet de l'expérimentation numérique :



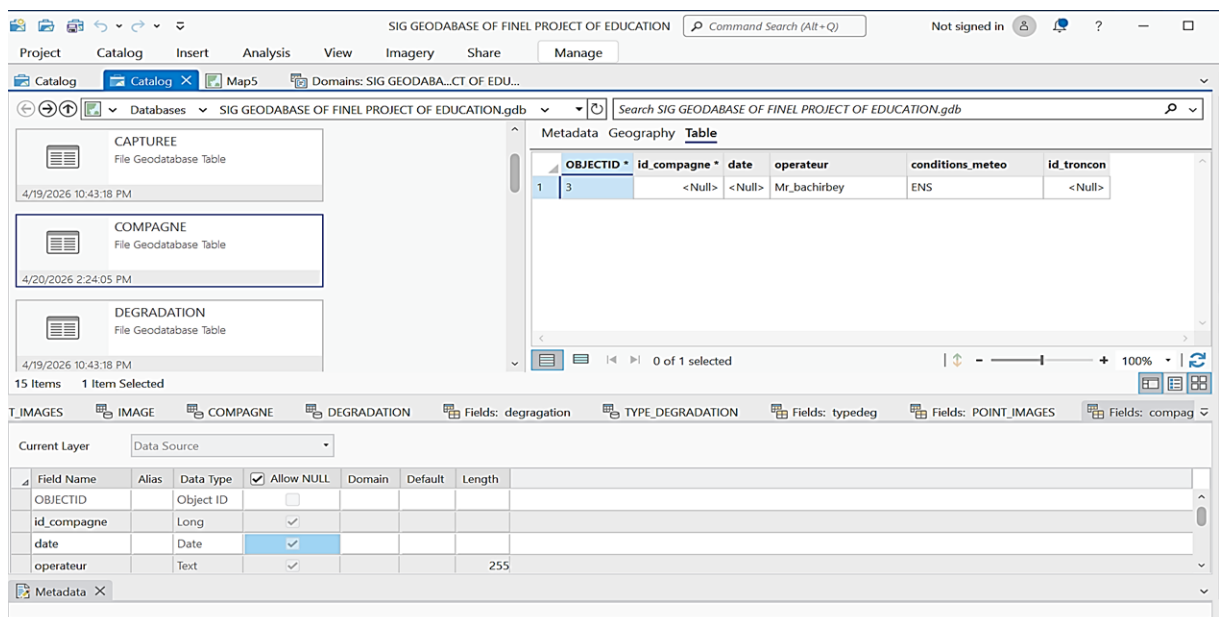
Figure II .5 : localisation de tronçon sous google maps

1) **Images** : Les images géoréférencées constituent la principale source d'information de ce projet. Chaque image est associée à un point géographique correspondant à sa position de prise de vue et est stockée au sein de la géodatabase avec ses attributs descriptifs. Cette organisation permet de localiser précisément les observations le long du réseau routier et d'accéder directement aux images depuis le SIG. Utilisées comme support de l'inspection visuelle automatisée, ces images fournissent une documentation objective et historisée de l'état des chaussées, facilitant la détection, l'analyse et le suivi des dégradations routières dans le temps. La figure II.6 ci-après présente la manière d'importer et de stocker ces images :



**Figure II .6 :** importation et stockage des images géoréférencées dans ArcGIS Pro

**a) Les tables :** Les tables attributaires représentent l'un des composants fondamentaux d'une géodatabase sous ArcGIS Pro. Organisées en lignes et en colonnes, elles permettent de stocker les informations descriptives relatives aux entités spatiales ainsi que les données non géographiques nécessaires à la gestion du projet. Elles assurent la structuration des attributs, facilitent l'établissement des relations entre les différentes classes d'entités et contribuent à l'exécution des analyses et requêtes au sein du SIG. La figure II.7 illustre l'organisation des tables attributaires de la géodatabase développée sous ArcGIS Pro. [8]



**Figure II .7 :** organisation des tables attributaires de la géodatabase sous ArcGIS Pro

## b) Relation entre les entités (relationship class) :

Les Relationship Classes permettent de modéliser les interactions et dépendances entre les différentes composantes de la géodatabase. Elles assurent la liaison entre les objets géographiques et leurs informations descriptives, en traduisant les associations identifiées lors de la phase de conception conceptuelle des données (MCD). Leur mise en œuvre sous ArcGIS Pro contribue à renforcer l'intégrité référentielle, à éviter les redondances et à faciliter l'accès aux informations associées. La figure II.8 présente un exemple de création d'une relation entre deux entités dans l'environnement ArcGIS Pro.

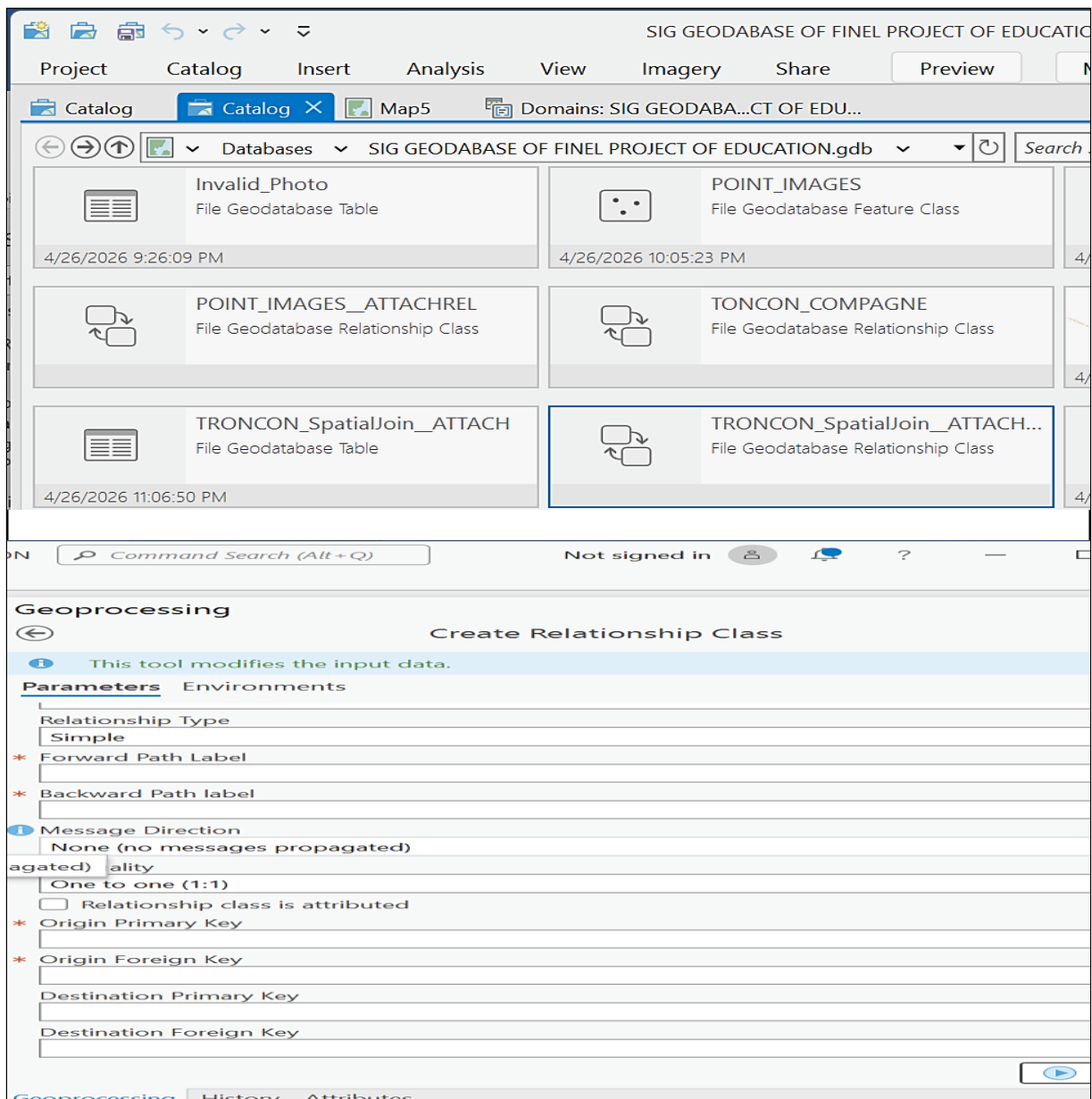


Figure II .8 : Paramétrage et gestion des relations sous ArcGIS Pro

## II.5.2 Conception automatique de la géodatabase à l'aide de la commande Python sous ArcGIS Pro

Après la création manuelle de la géodatabase sous ArcGIS Pro, une étape complémentaire consiste à automatiser sa conception à l'aide de Python et de la bibliothèque Arc Py. Cette automatisation ne remplace pas la phase de modélisation préalable, qui reste indispensable pour définir la structure logique de la base de données, mais elle permet de reproduire cette structure de manière rapide, cohérente et reproductible. En effet, la géodatabase constitue la structure native d'ArcGIS pour organiser, gérer et éditer les données géographiques, et sa mise en place repose généralement sur une succession d'étapes allant de l'identification des entités thématiques à la définition des relations et des propriétés des jeux de données.

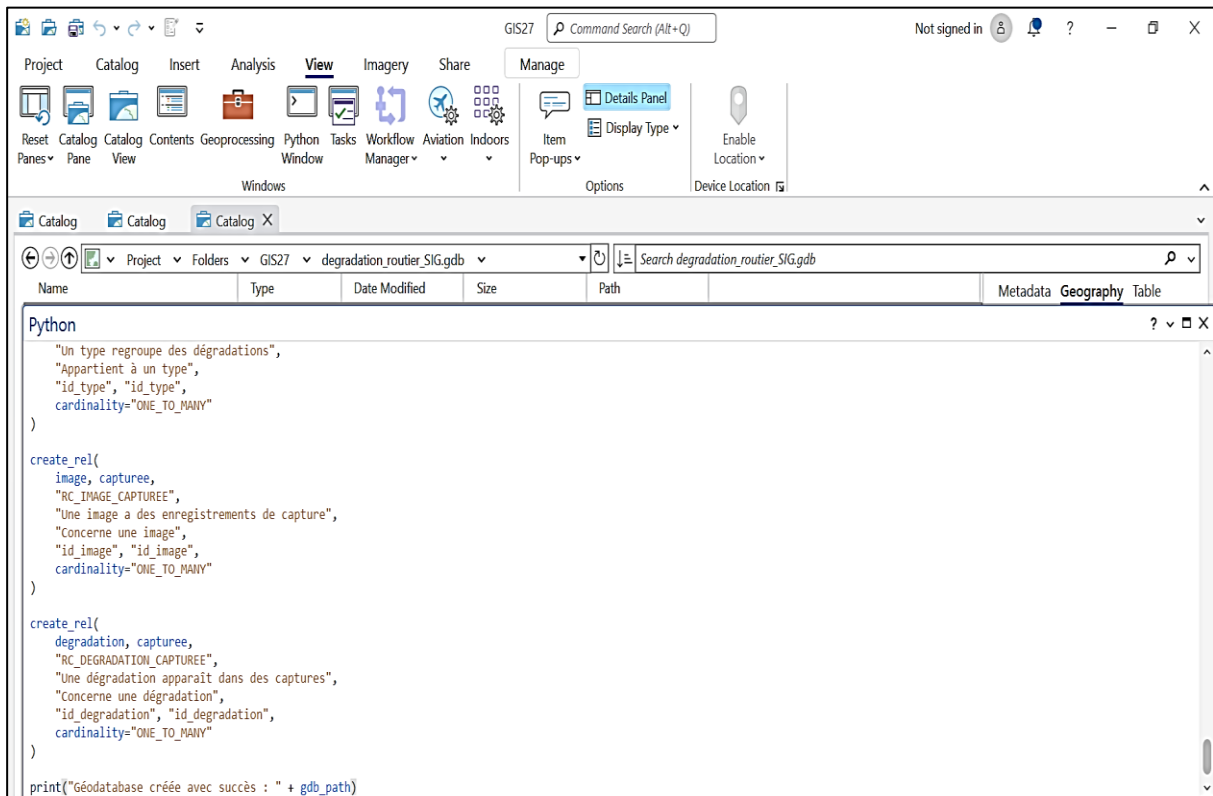
**II.5.2.1 Définition du Arcpy :** est une bibliothèque Python intégrée à ArcGIS Pro qui permet d'automatiser un grand nombre d'opérations de géotraitement et de gestion des données spatiales. Elle offre des fonctions pour créer des géodatabases, des classes d'entités, des tables, des champs et des relations entre objets, tout en facilitant le traitement répétitif des données géospatiales. Parmi ces principales fonctionnalités, on distingue: [24]

- **Accès aux outils de géotraitement :** Permet d'exécuter l'ensemble des outils natifs de la plateforme ArcGIS directement via du code. [24]
- **Modules spécialisés :** Dispose de nombreux modules (ex : `arcpy.mp` pour la mise en page et l'automatisation des cartes, `arcpy.sa` pour Spatial Analyst, `arcpy.da` pour les accès avancés aux données). [24]
- **Interopérabilité :** Facilite la combinaison des processus SIG avec des bibliothèques Python standards telles que Pandas, NumPy et Matplotlib

Dans ce contexte, ArcPy offre un cadre de travail particulièrement adapté à l'automatisation des tâches de géotraitement et de gestion des données dans ArcGIS Pro. Son utilisation permet de créer automatiquement les composants essentiels de la géodatabase, tels que la géodatabase fichier, le feature dataset, les classes d'entités, les tables attributaires, les champs et les relations entre objets. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment la réduction du temps d'exécution, la limitation des erreurs humaines et l'assurance d'une meilleure uniformité dans la structuration des données. Ainsi, l'automatisation par ArcPy vient renforcer la conception manuelle en rendant le modèle plus fiable, plus facilement mise à jour et mieux adapté à l'exploitation des données d'auscultation routière.

## II.5.2.2 Développement et exécution du script Python sous ArcGIS pro

L'exécution du script a permis de générer une géodatabase structurée, contenant les entités et tables nécessaires au suivi des tronçons, des campagnes, des images, des dégradations et de leurs relations Cette automatisation permet de reproduire fidèlement la structure définie lors de la phase de conception manuelle, tout en assurant une exécution rapide et homogène des traitements. la figure Figure II.9 ci-dessous illustre cette validation :



```
Python
"Un type regroupe des dégradations",
"Appartient à un type",
"id_type", "id_type",
cardinality="ONE_TO_MANY"
)

create_rel(
image, capturee,
"RC_IMAGE_CAPTUREE",
"Une image a des enregistrements de capture",
"Concerne une image",
"id_image", "id_image",
cardinality="ONE_TO_MANY"
)

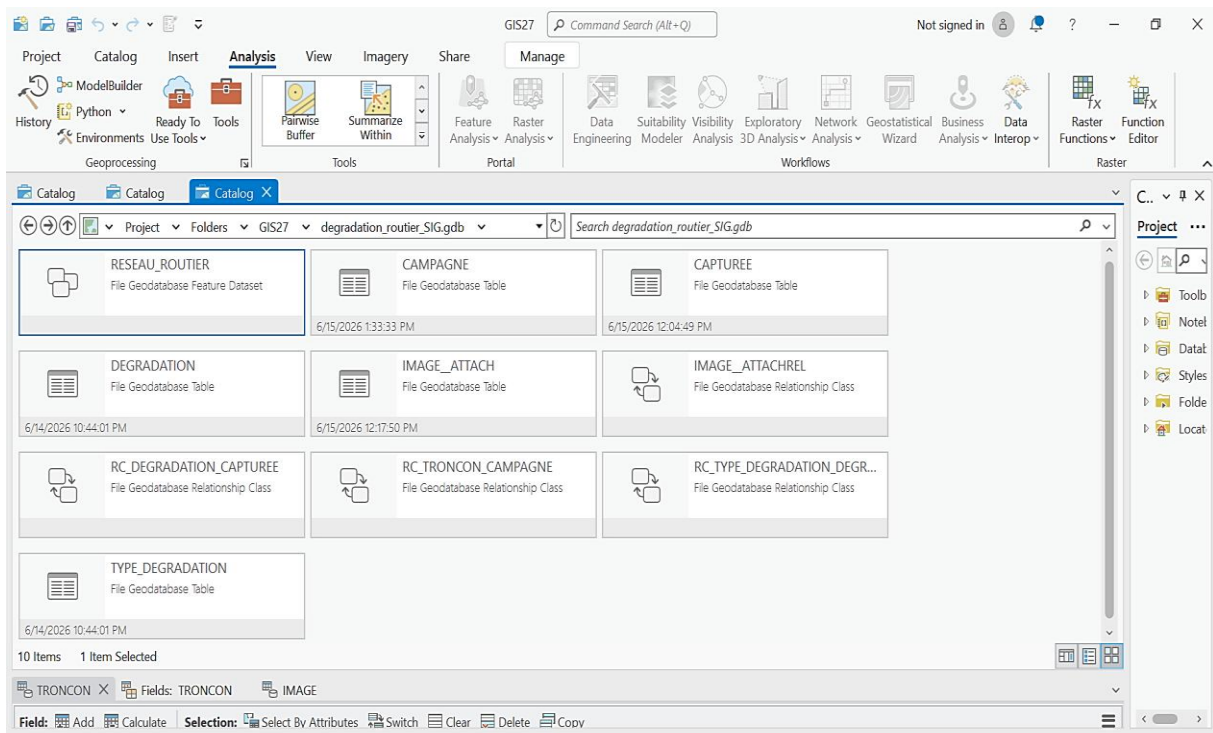
create_rel(
degradation, capturee,
"RC_DEGRADATION_CAPTUREE",
"Une dégradation apparaît dans des captures",
"Concerne une dégradation",
"id_degradation", "id_degradation",
cardinality="ONE_TO_MANY"
)

print("Géodatabase créée avec succès : " + gdb_path)
```

**Figure II.9:** Résultat d'exécution du programme Python dédié à la conception automatique de la géodatabase

## II.5.2.3 Résultats obtenus:

L'exécution du script a permis de générer une géodatabase structurée, contenant les entités et tables nécessaires au suivi des tronçons, des campagnes, des images, des dégradations et de leurs relations come illustre cette figure II.10 suivante :



**Figure II.10 :** Vue du catalogue de la géodatabase dans ArcGIS Pro

Parmi les résultats obtenus, la création automatique des domaines constitue un apport essentiel de la structure de la géodatabase. En effet, les domaines permettent de restreindre les valeurs autorisées dans certains champs afin d'éviter les incohérences et de renforcer l'intégrité des données. Dans le cadre de ce travail, ils ont été utilisés pour encadrer les attributs les plus sensibles du modèle, notamment ceux relatifs à la gravité, à la catégorie ou à certains identifiants fonctionnels. Cette organisation améliore la fiabilité de la base et facilite le contrôle des informations lors de l'alimentation des tables, comme montre les figures II.8 ci-dessous :

The screenshot shows the ArcGIS Pro interface with the Domains pane open. The Domains pane displays a table of domain configurations for the geodatabase. The table has the following columns: Domain Name, Description, Field Type, Domain Type, Split Policy, Merge Policy, Code, and Description.

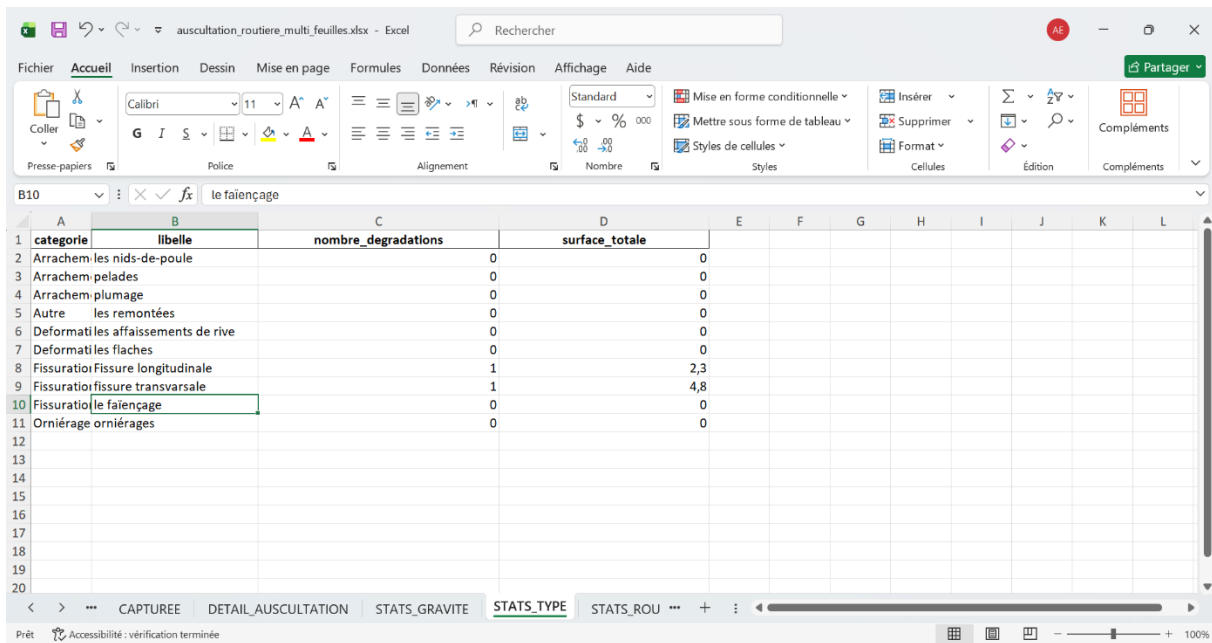
| Domain Name               | Description                | Field Type | Domain Type        | Split Policy | Merge Policy | Code         | Description  |
|---------------------------|----------------------------|------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| dom_categorie_degradation | Catégories de dégradation  | Text       | Coded Value Domain | Default      | Default      | Fissuration  | Fissuration  |
| dom_conditions_meteo      | Conditions météorologiques | Text       | Coded Value Domain | Default      | Default      | Orniérage    | Orniérage    |
| dom_gravite               | Niveaux de gravité         | Text       | Coded Value Domain | Default      | Default      | Déformation  | Déformation  |
| dom_type_route            | Types de route             | Text       | Coded Value Domain | Default      | Default      | Autre        | Autre        |
|                           |                            |            |                    |              |              | Arrachements | Arrachements |

**Figure II.11:** Configuration des domaines attributaires dans la géodatabase

À partir d'un autre programme python, il a également été possible de générer automatiquement un classeur Excel multi-feuilles ainsi qu'un rapport texte récapitulatif. Ces sorties offrent une présentation structurée des données et facilitent leur consultation

### a. Classeur Excel multi-feuilles:

Le programme a produit un classeur Excel composé de plusieurs feuilles, chacune correspondant à une entité, à une catégorie de données ou à un ensemble de résultats distincts. Cette structuration permet de séparer clairement les informations, de faciliter leur consultation et de simplifier les opérations de vérification, de tri et d'exploitation des données. Elle rend également possible une lecture plus organisée des résultats, tout en conservant les éléments dans un même fichier de travail come illustre cette figure :



The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

| 1          | 2                         | 3                   | 4              | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------|---------------------------|---------------------|----------------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| catégorie  | libelle                   | nombre_degradations | surface_totale |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Arrachem   | les nids-de-poule         | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Arrachem   | pelades                   | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Arrachem   | plumage                   | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Autre      | les remontées             | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Deformati  | les affaissements de rive | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Deformati  | les flaches               | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Fissuratio | Fissure longitudinale     | 1                   | 2,3            |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Fissuratio | fissure transversale      | 1                   | 4,8            |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Fissuratio | le faïençage              | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Orniérage  | orniérages                | 0                   | 0              |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

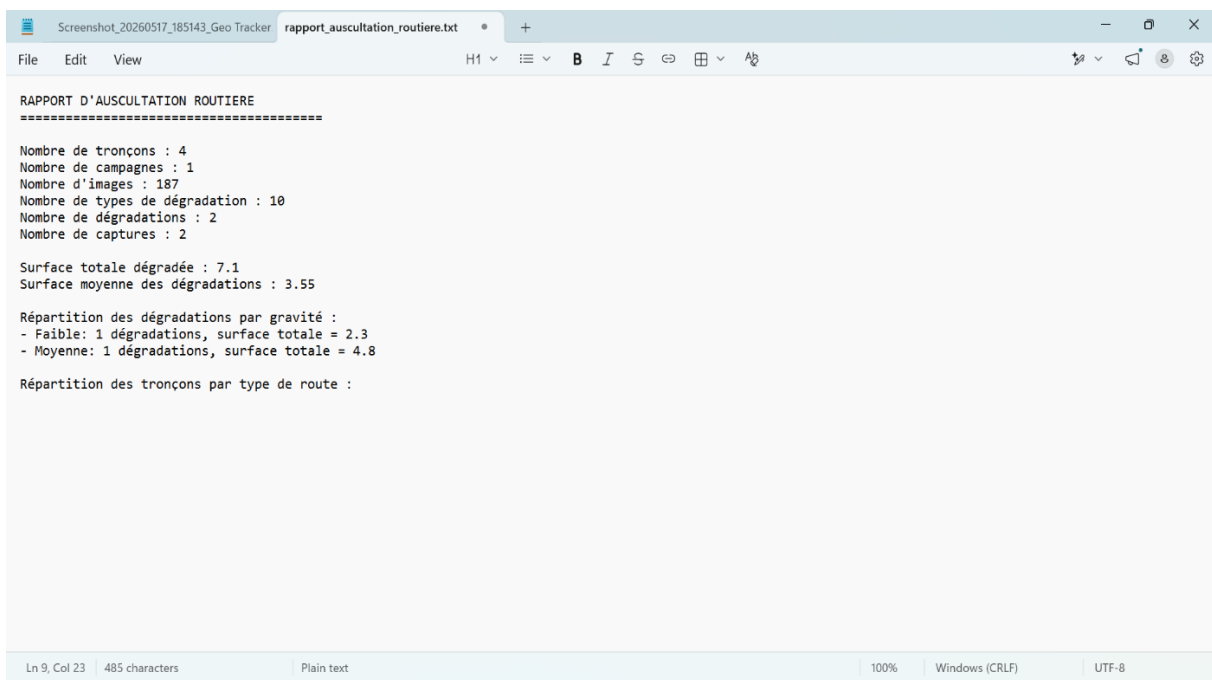
**Figure II.12** : Classeur Excel multi-feuilles dédié à la gestion et à l'analyse des données d'auscultation

### b. Rapport texte récapitulatif

Le programme a également généré un rapport texte récapitulatif permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus à l'issue du traitement automatisé. Ce document présente de manière structurée les informations essentielles relatives aux données analysées, telles que les statistiques globales, les indicateurs calculés et les éventuelles observations significatives.

Ce rapport facilite l'exploitation et l'interprétation des résultats en offrant une vue d'ensemble claire et concise, sans nécessiter la consultation directe des tables de données. Il constitue ainsi un outil d'aide à l'analyse et à la prise de décision, tout en assurant la traçabilité des traitements réalisés.

En complément du classeur Excel généré, ce rapport fournit une synthèse textuelle des résultats, améliorant leur lisibilité et favorisant leur intégration dans les documents techniques, les rapports d'étude ou les présentations des travaux réalisés [24] comme montre la figure Figure II.8 ci-après :



```
RAPPORT D'AUSCULTATION ROUTIERE
=====

Nombre de tronçons : 4
Nombre de campagnes : 1
Nombre d'images : 187
Nombre de types de dégradation : 10
Nombre de dégradations : 2
Nombre de captures : 2

Surface totale dégradée : 7.1
Surface moyenne des dégradations : 3.55

Répartition des dégradations par gravité :
- Faible: 1 dégradations, surface totale = 2.3
- Moyenne: 1 dégradations, surface totale = 4.8

Répartition des tronçons par type de route :
```

**Figure II.13** : Rapport du texte récapitulatif généré automatiquement

#### **II. 5.2.4 Discussion des résultats**

Les résultats obtenus montrent que l'automatisation a permis de formaliser une structure cohérente et répétable, conforme au modèle logique de données défini au préalable. Cette cohérence réduit les risques d'erreurs, évite les opérations répétitives et simplifie les mises à jour futures de la base. Toutefois, l'efficacité du processus dépend de la qualité des noms de champs, de la présence effective des enregistrements et de la bonne correspondance entre les clés de liaison des différentes tables.

## II.6 Structuration orientée IA et 3D :

Les données géospatiales intégrées dans la géodatabase ont été structurées de manière à être directement exploitables par des techniques d'intelligence artificielle, notamment les méthodes d'apprentissage profond (Deep Learning), pour la détection, la classification et la quantification automatique des dégradations routières. Cette organisation favorise la préparation des données, leur traitement automatisé ainsi que l'intégration des résultats issus des modèles d'analyse.

Au-delà de sa fonction de stockage, la géodatabase constitue une plateforme centralisée de gestion et de valorisation des données routières. Elle permet d'organiser les informations acquises sur le terrain, de faciliter les traitements automatisés et de fournir un support fiable pour l'analyse et l'aide à la décision en matière de maintenance du patrimoine routier. Sa conception vise ainsi à optimiser l'exploitation des données collectées tout en préparant leur utilisation dans des approches avancées basées sur l'intelligence artificielle. [17]

Par ailleurs, la structure de données mise en place a été conçue de manière à rester compatible avec de futures évolutions du système, notamment l'intégration de modèles tridimensionnels issus de la photogrammétrie, de relevés LiDAR ou d'autres techniques de numérisation 3D. Bien que ces développements ne fassent pas partie du périmètre du présent projet en raison des contraintes de temps et des objectifs fixés au PFE, l'architecture de la géodatabase permet d'envisager à terme l'intégration de représentations 3D et de solutions d'analyse avancées destinées au suivi intelligent des infrastructures routières. Ainsi, l'association des SIG, des géodatabases et des méthodes d'intelligence artificielle constitue une base solide pour de futurs travaux portant sur la modélisation 3D, le jumeau numérique et la gestion intelligente du patrimoine routier. [33], [34]



**CHAPITRE III : ACQUISITION ET  
ALIMENTATION**

## CHAPITRE III : ACQUISITION ET ALIMENTATION

### III.1 DISPOSITIF :

Le dispositif d'acquisition utilisé dans ce projet consiste en un smartphone **Apple iPhone 17 Pro Max** fixé sur un véhicule embarqué, positionné de manière stable à l'aide d'un support pare-brise afin de filmer en continu la chaussée au cours du déplacement comme illustre la **figure III.1**. Et un autre smartphone, sur lequel est installée une application dédiée (**Geo-Tracker**), également dédié au projet, qui synchronise la prise de vue de vidéos avec la position géographique (GPS intégré) et la date/heure. Cette configuration permet de produire un jeu de données vidéos géoréférencées, puis d'en extraire des images géoréférencées directement exploitables dans la géodatabase SIG, et préparées à l'analyse par intelligence artificielle et à la modélisation 3D du tronçon routier inspecté.



**Figure III.1** : Système d'acquisition et enregistrement vidéo avec smartphone fixé sur le véhicule à l'aide d'un support

### III.1.1 Caractéristiques du smartphone utilisé pour prendre le vidéo :

Le dispositif d'acquisition choisi pour ce projet repose sur un smartphone Apple iPhone 17 Pro Max comme montre la figure III.2, choisi pour ses performances élevées et la qualité de ses capteurs. Cela permet une capture claire et détaillée de la surface de la route.

L'iPhone 17 Pro Max est un smartphone conçu par Apple et annoncé le 9 septembre 2025, remplaçant l'iPhone 16 Pro Max. Il reprend l'architecture et les innovations du 17 Pro dans un format plus grand, avec un écran OLED Super Retina XDR de 6,9 pouces (2 868 × 1 320 pixels, 460 ppp), ProMotion à 120 Hz, Always-On, luminosité maximale de 3 000 nits et revêtement antireflet. Le châssis unibody en aluminium série 7000 intègre également un système de refroidissement par chambre à vapeur. Comme le modèle Pro, il intègre la puce A19 Pro et un système photo composé de trois capteurs Fusion de 48 MP, dont un téléobjectif atteignant un zoom optique 8x. La caméra frontale est de 18 MP avec Center Stage. Le stockage atteint jusqu'à 2 To, une capacité inédite sur iPhone. L'autonomie se distingue nettement, avec jusqu'à 37 heures de lecture vidéo, établissant un record pour la gamme, contre 29 heures pour l'iPhone 16 Pro Max. [18]



**Figure III.2 :** iPhone 17 Pro Ma

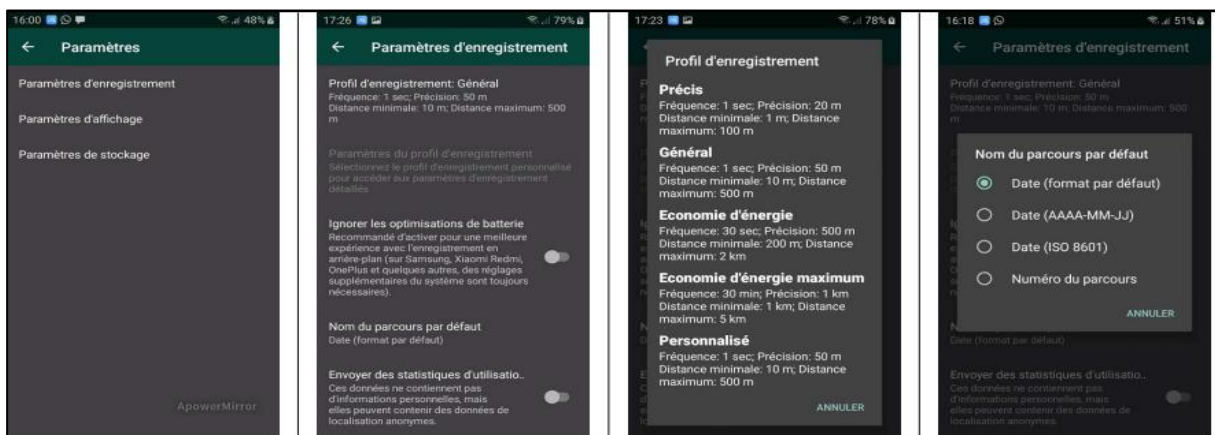
### III.1.2 Application utilisée pour l'acquisition des métadonnées des tronçons : « Geo-Tracker » :

L'application Geo Tracker est un outil de suivi GPS mobile qui permet de cartographier des itinéraires et d'enregistrer des métadonnées géospatiales pour des tronçons. Elle est particulièrement utile pour collecter des données de terrain exploitables dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG). [16]

Géo Tracker est une application GPS sur smartphone pour enregistrer vos parcours de randonnée. L'application est gratuite et téléchargeable dans le Play Store. [16]

Les paramètres d'enregistrement dans l'application Geo-Tracker définissent la fréquence et la qualité des points de position enregistrés le long du tronçon routier. Ces paramètres incluent notamment la précision du GPS (par exemple 50 m), la distance minimale parcourue entre deux points (par exemple 10 m) et la fréquence d'enregistrement, ce qui permet de contrôler la densité du tracé sans surcharger la mémoire du smartphone. [16]

La figure III.3 ci-dessous présente les paramètres d'enregistrement utilisés.

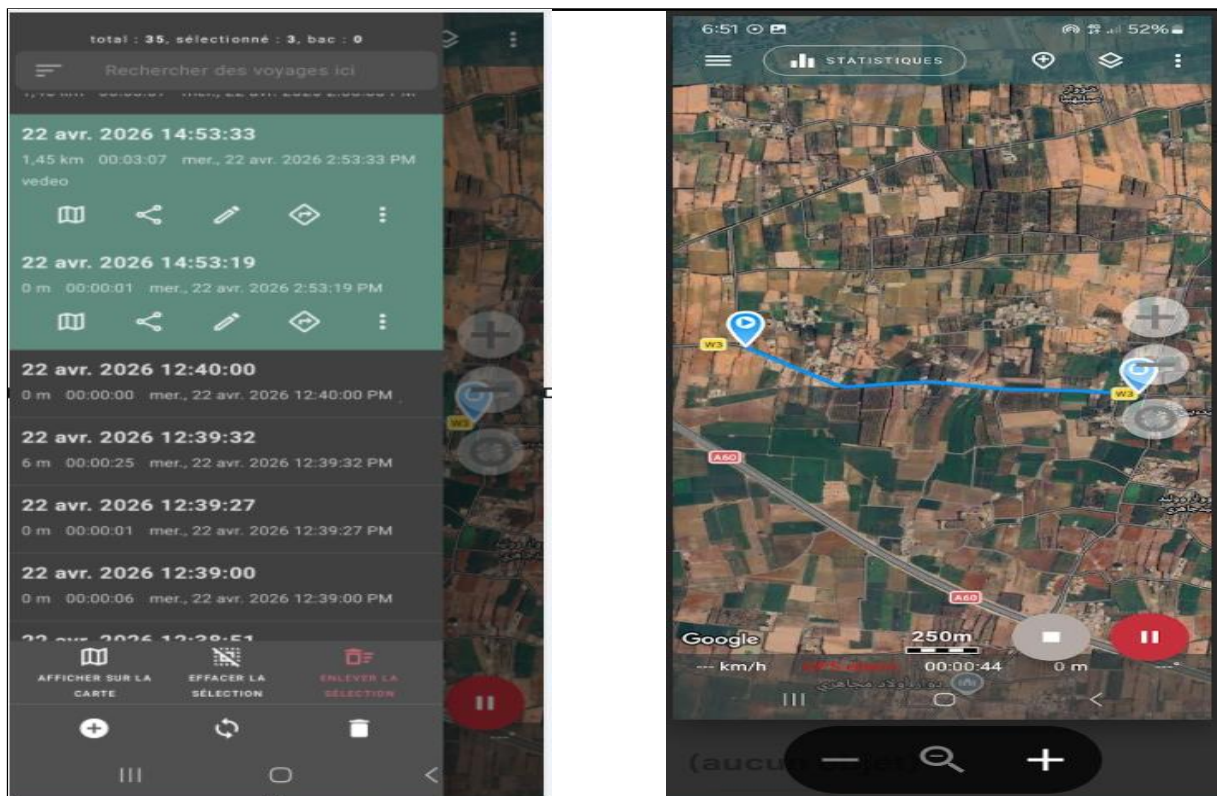


**Figure III.3:** Les paramètres d'enregistrement dans l'application Geo-Tracker

L'application **Geo-Tracker** définit où et sous quel format sont conservés les parcours géoréférencés correspondant aux tronçons routiers inspectés. Par défaut, les traces enregistrées sont stockées dans un dossier interne du smartphone et ne sont pas automatiquement sauvegardées sous forme de fichiers GPX tant qu'un export explicite n'est pas lancé. Lorsque l'enregistrement est exporté, il est généralement généré au format **GPX** et stocké soit dans la mémoire interne du smartphone, soit, si le dispositif est équipé d'une carte micro-SD, dans un dossier dédié sur cette carte. Cette configuration permet ensuite de transférer les fichiers GPX vers un poste de travail pour les intégrer dans la géodatabase SIG, où ils servent de base à la

localisation précise des images et à leur exploitation dans le cadre de l'analyse par intelligence artificielle et de la modélisation 3D du réseau routier.

Les **paramètres d'affichage** de l'application **Geo-Tracker** définissent la manière dont les tronçons géoréférencés apparaissent à l'écran pendant et après l'enregistrement. Pendant l'enregistrement, la trace du parcours est généralement affichée en rouge sur la carte, ce qui permet de visualiser en temps réel le trajet en cours sur le tronçon inspecté. Une fois l'enregistrement terminé, la trace est automatiquement passée en bleu, indiquant que la section est finalisée et prête à être consultée ou exportée [16], come montre la figure III.4 ci-après :



**Figure III.4 :** Paramètre d'affichage des métadonnées sous Geo-Tracker

L'utilisation de l'application Geo-Tracker dans ce projet permet de structurer de manière précise et automatisée l'acquisition des métadonnées géographiques associées aux tronçons routiers inspectés. Grâce à ses paramètres d'enregistrement, de stockage et d'affichage, l'application garantit une traçabilité claire du trajet, une conservation des données sous forme de traces GPX facilement transférables et une représentation visuelle intuitive des parcours sur la carte.[16]

Enfin, il est possible d'exporter le fichier GPX généré par l'application Geo-Tracker et de l'envoyer par **Gmail**, ce qui permet de partager commodément les métadonnées du trajet

tout en garantissant leur intégrité.

## **III.2 GEOREFERENCEMENT DES IMAGES**

Un géoréférencement est une action qui consiste à relier un objet et les données, les géoréférences, qui y sont associées à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées géographiques.[39]

Le géoréférencement est la technique de positionnement spatial d'une entité dans un cadre unique et une situation géographique bien définie dans un système de coordonnées et de références spécifiques. Il consiste en une opération courante dans le système d'information géographique (SIG) pour les deux objets raster (image bitmap pixels) à des objets vectoriels (points, lignes, polygones et polygones qui représentent des objets physiques).[39]

De nombreuses images numériques représentent une portion de l'espace terrestre, notamment les cartes, plans, photographies aériennes, images satellitaires et documents anciens. Lorsqu'elles portent une information spatiale exploitable, elles peuvent être intégrées dans un système d'information géographique à la suite d'une opération de géoréférencement. Cette étape consiste à associer à l'image un système de coordonnées géographiques précis, de manière à la transformer en une donnée raster compatible avec les traitements SIG. Une fois géoréférencées, ces images peuvent être superposées à d'autres couches de données raster ou vectorielles, à condition qu'elles partagent un même référentiel spatial. Elles peuvent également être utilisées comme fond cartographique et comme support à la digitalisation d'objets géographiques, contribuant ainsi à l'analyse, à la visualisation et à l'interprétation spatiale des informations.[39]

## **III.3 CHAINE DE TRAITEMENT :**

### **III.3.1 Extraction des images à partir de la vidéo :**

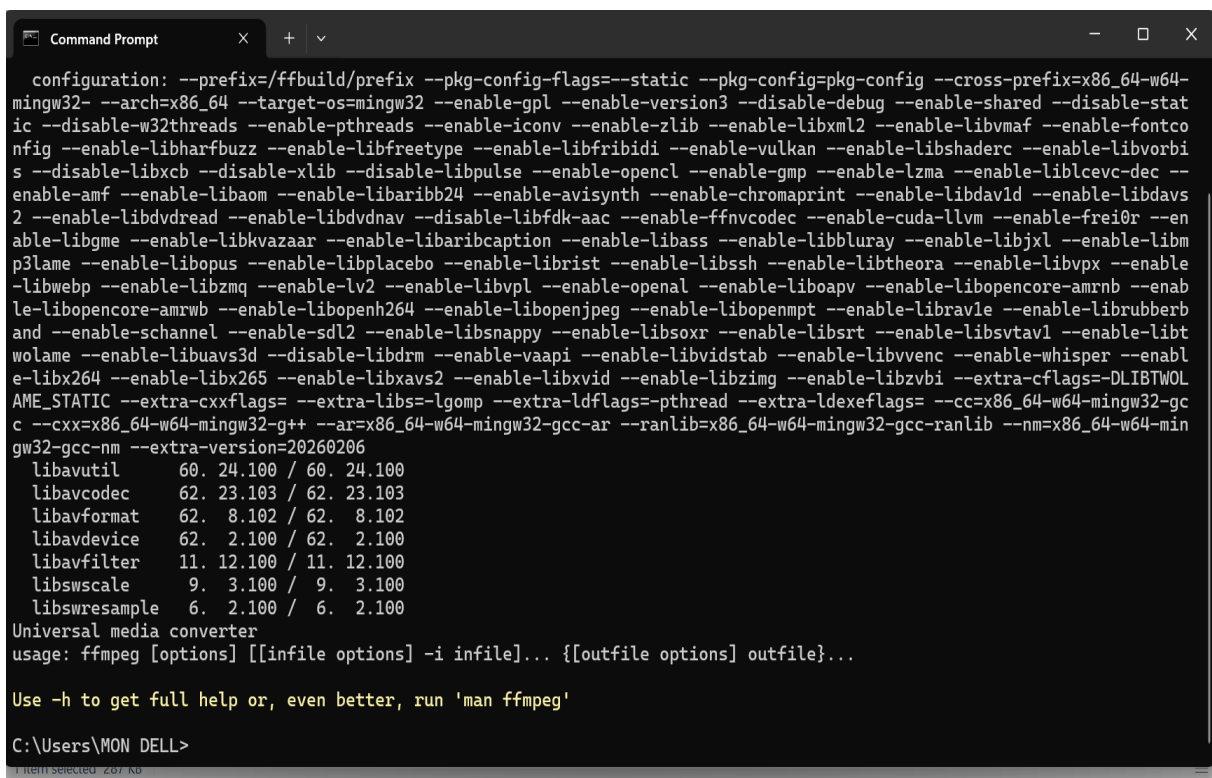
L'extraction des images à partir d'une vidéo à l'aide de **FFmpeg** consiste à convertir une séquence vidéo en une série d'images fixes. Cette opération est particulièrement utile dans le cadre du traitement audiovisuel, car elle facilite l'analyse, l'indexation et le prétraitement des contenus vidéo. Grâce à sa flexibilité et à la précision de ses commandes, **FFmpeg** permet d'extraire une image à un instant précis, plusieurs images à intervalles réguliers, ou l'ensemble

des images d'une vidéo selon les besoins de l'utilisateur. [40]

**FFmpeg** est un projet logiciel libre et open source regroupant un ensemble de bibliothèques et de programmes dédiés au traitement des fichiers et flux multimédias, notamment vidéo et audio. Au cœur de ce projet se trouve l'outil en ligne de commande *ffmpeg*, spécialement conçu pour le traitement des contenus audiovisuels. Il est largement utilisé pour le transcodage de formats, les opérations de montage de base (découpage et concaténation), le redimensionnement des vidéos, l'application d'effets de postproduction ainsi que la conformité aux normes internationales telles que SMPTE et ITU.[40]

FFmpeg constitue aujourd'hui un composant essentiel dans le flux de travail de nombreux projets logiciels. Ses bibliothèques sont intégrées au cœur de plusieurs lecteurs multimédias tels que VLC media player, et participent également aux traitements internes de plateformes de diffusion vidéo comme YouTube. Grâce à l'intégration d'un grand nombre d'encodeurs et de décodeurs pour divers formats audio et vidéo, FFmpeg représente une solution particulièrement performante pour le transcodage aussi bien des fichiers multimédias courants que des formats moins répandus.[40]

La figure III.5 présente la fenêtre de commande illustrant les principales fonctionnalités de FFmpeg.



```
Command Prompt
configuration: --prefix=/ffbuild/prefix --pkg-config-flags=--static --pkg-config=pkg-config --cross-prefix=x86_64-w64-
mingw32- --arch=x86_64 --target-os=mingw32 --enable-gpl --enable-version3 --disable-debug --enable-shared --disable-stat
ic --disable-w32threads --enable-pthreads --enable-iconv --enable-zlib --enable-libxml2 --enable-libvmaf --enable-fontco
nfig --enable-libharfbuzz --enable-libfreetype --enable-libfribidi --enable-vulkan --enable-libshaderc --enable-libvorbi
s --disable-libxcb --disable-xlib --disable-libpulse --enable-opencl --enable-gmp --enable-lzma --enable-liblevcv-dec --
enable-amf --enable-libaom --enable-libaribb24 --enable-avisynth --enable-chromaprint --enable-libdav1d --enable-libdavs
2 --enable-libdvdread --enable-libdvdnav --disable-libfdk-aac --enable-ffnvcodec --enable-cuda-llvm --enable-frei0r --en
able-libgme --enable-libkvazaar --enable-libaribcaption --enable-libass --enable-libbluray --enable-libjxl --enable-libm
p3lame --enable-libopus --enable-libplacebo --enable-librist --enable-libssh --enable-libtheora --enable-libvpx --enable
-libwebp --enable-libzmq --enable-lv2 --enable-libvpl --enable-openssl --enable-libopenal --enable-libopenaptx --enable-libopencore-amrnb --enab
le-libopencore-amrwb --enable-libopenh264 --enable-libopenjpeg --enable-libopenmpt --enable-librav1e --enable-librubberb
and --enable-schannel --enable-sdl2 --enable-libsndio --enable-libsoxr --enable-libsrt --enable-libsvtav1 --enable-libt
wolame --enable-libuavs3d --disable-libdrm --enable-vaapi --enable-libvidstab --enable-libvvc --enable-whisper --enabl
e-libx264 --enable-libx265 --enable-libxavs2 --enable-libxvid --enable-libzimg --enable-libzvb --extra-cflags=-DLIBTWOL
AME_STATIC --extra-cxxflags= --extra-libs=lgomp --extra-ldflags=-pthread --extra-ldexeflags=-cc-x86_64-w64-mingw32-gc
c --cxx=x86_64-w64-mingw32-g++ --ar=x86_64-w64-mingw32-gcc-ar --ranlib=x86_64-w64-mingw32-gcc-ranlib --nm=x86_64-w64-min
gw32-gcc-nm --extra-version=20260206
libavutil      60. 24.100 / 60. 24.100
libavcodec     62. 23.103 / 62. 23.103
libavformat    62.  8.102 / 62.  8.102
libavdevice    62.  2.100 / 62.  2.100
libavfilter    11. 12.100 / 11. 12.100
libswscale     9.  3.100 / 9.  3.100
libswresample  6.  2.100 / 6.  2.100
Universal media converter
usage: ffmpeg [options] [[infile options] -i infile]... {[outfile options] outfile}...

Use -h to get full help or, even better, run 'man ffmpeg'

C:\Users\MON DELL>
```

Figure III.5 : Fenêtre de commande illustrant les fonctionnalités de FFmpeg

- À partir de cette recherche, nous pouvons conclure que la conversion des vidéos à l'aide de **FFmpeg** constitue une méthode professionnelle, précise et fiable pour l'extraction d'images de haute qualité. En effet, cet outil permet d'obtenir des images claires et exploitables tout en conservant les informations temporelles associées à chaque frame, ce qui est essentiel pour des applications telles que l'annotation, la détection automatique par intelligence artificielle et la photogrammétrie. De plus, sa flexibilité en fait une solution adaptée aux besoins de traitement et d'analyse dans un cadre académique et technique. La figure ci-dessous illustre les résultats obtenus à l'issue de cette extraction :



**Figure III.6 :** Images converties à l'aide de FFmpeg

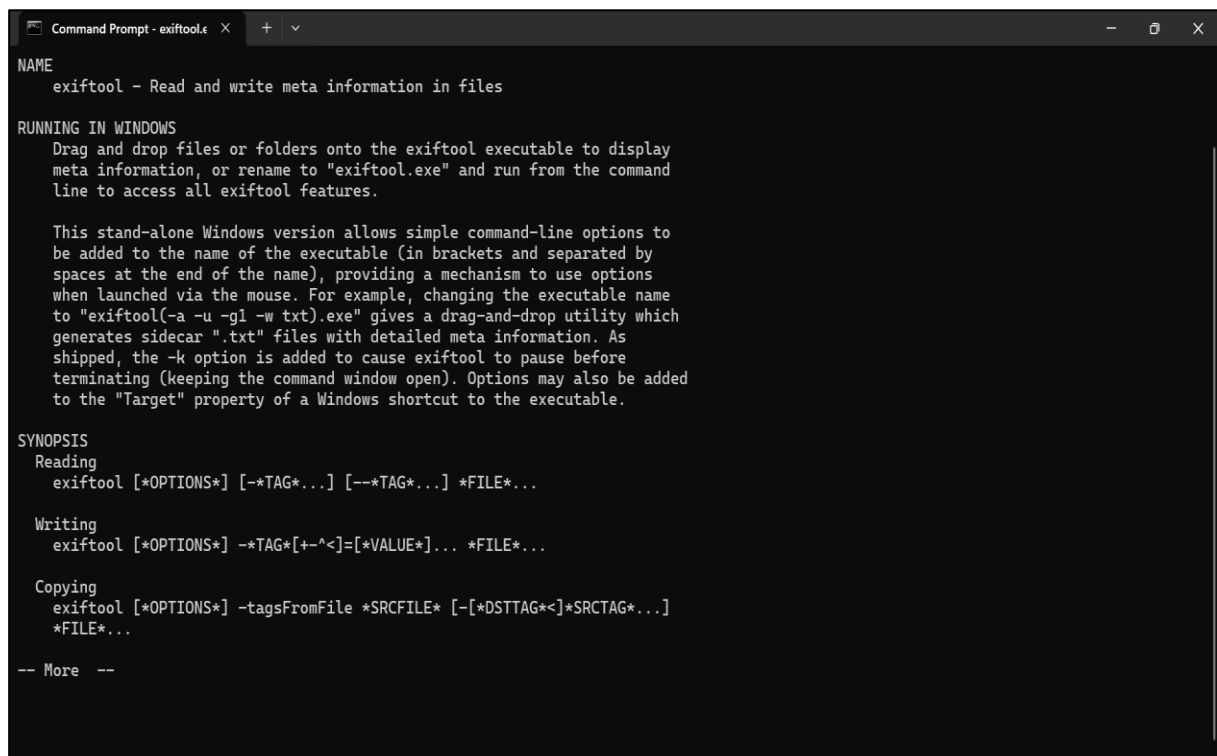
Le traitement consiste à extraire des images successives à intervalle fixe à partir d'une vidéo, puis à leur associer des coordonnées géographiques issues d'un relevé GPS. Comme les images extraites ne comportent pas initialement de coordonnées spatiales, une étape de synchronisation temporelle entre les métadonnées GPS et les horodatages des images est nécessaire avant le géoréférencement dans ArcGIS Pro

### **III.3.2 Intégration des métadonnées GPS dans les images à l'aide d'ExifTool :**

**ExifTool** est un utilitaire en ligne de commande largement utilisé pour la gestion des métadonnées associées aux fichiers numériques. Il permet de lire, modifier, ajouter et supprimer diverses informations contenues dans les fichiers image, vidéo et autres formats multimédias. Dans le cadre de ce travail, ExifTool constitue un outil essentiel pour l'injection des

métadonnées EXIF, en particulier les coordonnées géographiques, dans les images extraites à partir d'une vidéo. Cette opération est nécessaire afin de doter les images de références spatiales exploitables lors des étapes ultérieures de géolocalisation et de géoréférencement. L'intégration des informations GPS dans les images facilite leur traitement dans des environnements SIG, notamment ArcGIS Pro, où elles peuvent être utilisées pour positionner avec précision les données sur une carte. Ainsi, ExifTool joue un rôle central dans la conversion de données visuelles non géoréférencées en objets spatiaux exploitables dans une démarche d'analyse géographique. [20]

La figure III.5 présente la fenêtre de commande illustrant les principales fonctionnalités d'« ExifTool »



```
Command Prompt - exiftool.ε
NAME
exiftool - Read and write meta information in files

RUNNING IN WINDOWS
Drag and drop files or folders onto the exiftool executable to display
meta information, or rename to "exiftool.exe" and run from the command
line to access all exiftool features.

This stand-alone Windows version allows simple command-line options to
be added to the name of the executable (in brackets and separated by
spaces at the end of the name), providing a mechanism to use options
when launched via the mouse. For example, changing the executable name
to "exiftool(-a -u -gl -w txt).exe" gives a drag-and-drop utility which
generates sidecar ".txt" files with detailed meta information. As
shipped, the -k option is added to cause exiftool to pause before
terminating (keeping the command window open). Options may also be added
to the "Target" property of a Windows shortcut to the executable.

SYNOPSIS
Reading
exiftool [*OPTIONS*] [-*TAG*...] [--*TAG*...] *FILE*...

Writing
exiftool [*OPTIONS*] -*TAG*[+^<]=[*VALUE*]... *FILE*...

Copying
exiftool [*OPTIONS*] -tagsFromFile *SRCFILE* [-[*DSTTAG*<]*SRCTAG*...]
*FILE*...

-- More --
```

Figure III.7: Fenêtre de commande illustrant les fonctionnalités de « ExifTool »

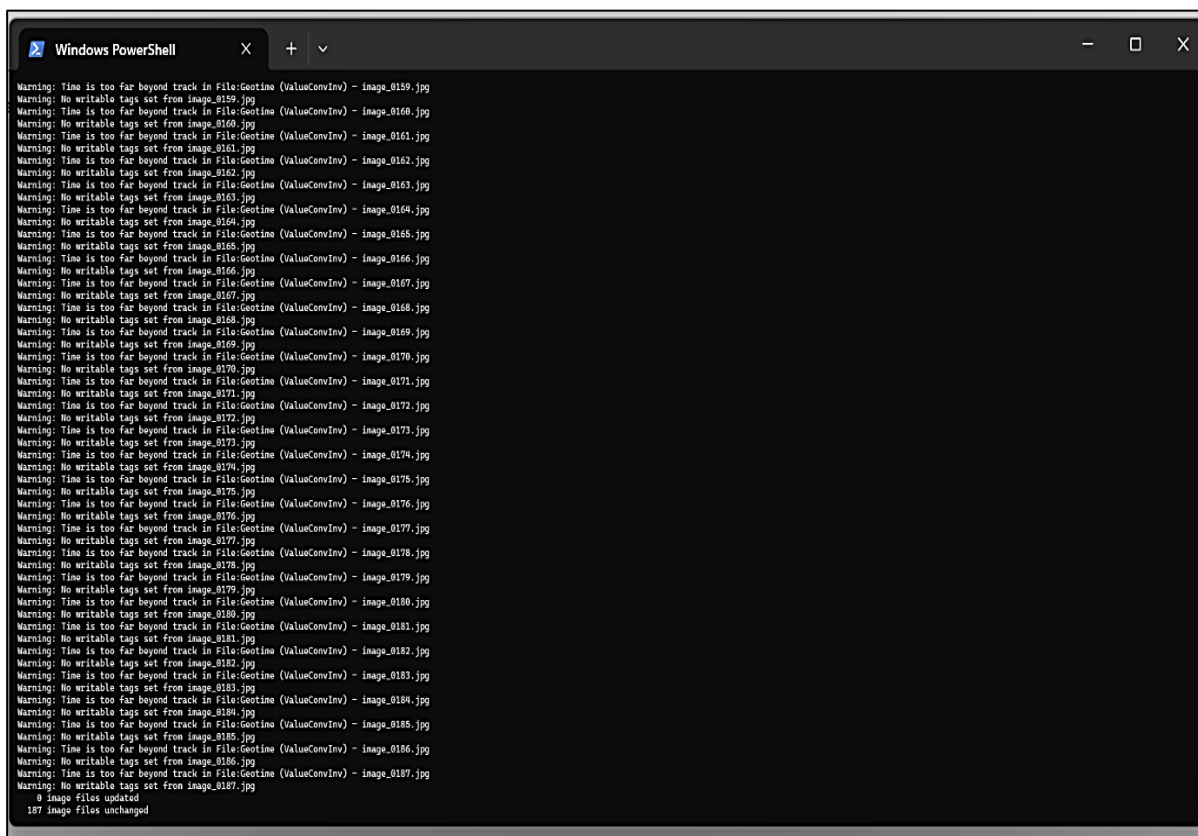
### III.3.2.1 Horodatages de création (DateTimeOriginal) :

« **DateTimeOriginal** » correspond au moment exact de la prise de vue tel qu'il est enregistré dans les métadonnées EXIF. Ce champ constitue une référence temporelle essentielle pour l'organisation, la synchronisation et le géoréférencement des images, notamment lorsqu'il est associé à des données GPS intégrées à l'aide d'ExifTool. [19]

Dans le cadre de cette campagne, l'horodatage initial correspondant au début de la vidéo et au début de l'enregistrement GPS effectué par le **géotracker** a été identifié comme suit :

2026-04-22 02 :53 :33. Il n'est donc pas possible d'effectuer la synchronisation avant d'avoir réglé ce temps d'origine. La procédure consiste à définir un horodatage de référence pour les images initiales, à corriger les éventuels décalages entre les sources, puis à appliquer un incrément fixe d'une seconde à chaque image afin de générer une séquence temporelle continue.

Après la validation du code EXIF, le logiciel lance le traitement des images en prenant en compte les paramètres d'origine, notamment le temps initial associé aux métadonnées. Comme illustre la figure III.8 :



```
Windows PowerShell
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0159.jpg
Warning: No writable tags set from image_0159.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0160.jpg
Warning: No writable tags set from image_0160.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0161.jpg
Warning: No writable tags set from image_0161.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0162.jpg
Warning: No writable tags set from image_0162.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0163.jpg
Warning: No writable tags set from image_0163.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0164.jpg
Warning: No writable tags set from image_0164.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0165.jpg
Warning: No writable tags set from image_0165.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0166.jpg
Warning: No writable tags set from image_0166.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0167.jpg
Warning: No writable tags set from image_0167.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0168.jpg
Warning: No writable tags set from image_0168.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0169.jpg
Warning: No writable tags set from image_0169.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0170.jpg
Warning: No writable tags set from image_0170.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0171.jpg
Warning: No writable tags set from image_0171.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0172.jpg
Warning: No writable tags set from image_0172.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0173.jpg
Warning: No writable tags set from image_0173.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0174.jpg
Warning: No writable tags set from image_0174.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0175.jpg
Warning: No writable tags set from image_0175.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0176.jpg
Warning: No writable tags set from image_0176.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0177.jpg
Warning: No writable tags set from image_0177.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0178.jpg
Warning: No writable tags set from image_0178.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0179.jpg
Warning: No writable tags set from image_0179.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0180.jpg
Warning: No writable tags set from image_0180.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0181.jpg
Warning: No writable tags set from image_0181.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0182.jpg
Warning: No writable tags set from image_0182.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0183.jpg
Warning: No writable tags set from image_0183.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0184.jpg
Warning: No writable tags set from image_0184.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0185.jpg
Warning: No writable tags set from image_0185.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0186.jpg
Warning: No writable tags set from image_0186.jpg
Warning: Time is too far beyond track in File:Geotime (ValueConvInv) - image_0187.jpg
Warning: No writable tags set from image_0187.jpg
0 image files updated
187 image files unchanged
```

Figure III.8 : Traitement des images avec ExifTool pour corriger l'horodatage d'origine

### III.3.2.2 Utilisation d'ExifTool pour géolocaliser les images à partir d'un fichier GPX :

La fonctionnalité de géolocalisation d'ExifTool permet d'ajouter des balises GPS aux images à partir des données contenues dans un fichier journal de trace GPS. Après le chargement de ce fichier, une interpolation linéaire est appliquée afin de déterminer la position GPS correspondant au moment de la prise de vue. Les balises géographiques suivantes sont ensuite renseignées dans l'image, lorsque les informations associées sont disponibles : latitude, longitude, altitude et DateStamp.[19]

La figure III.9 ci-dessous présente le fichier GPX utilisé dans ce projet, envoyé au PC par Gmail afin de garantir sa précision, puis ouvert dans Chrome pour la visualisation des informations

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8' standalone='yes' ?>
<gpx xmlns="http://www.topografix.com/GPX/1/1" xmlns:geotracker="http://ilyabogdanovich.com/gpx/extensions/geotracker" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:schemaLocation="http://www.topografix.com/GPX/1/1 http://www.topografix.com/GPX/1/1/gpx.xsd" version="1.1" creator="Enregistré par Geo Tracker pour Android de Ilya
Bogdanovich">
  <metadata>
    <name>22 avr. 2026 14:53:33</name>
    <author>
      <name>Enregistré par Geo Tracker pour Android de Ilya Bogdanovich</name>
      <link href="https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker" />
    </author>
    <link href="https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker" />
    <time>2026-04-22T13:53:33Z</time>
  </metadata>
  <trk>
    <name>22 avr. 2026 14:53:33</name>
    <src>Enregistré par Geo Tracker pour Android de Ilya Bogdanovich</src>
    <link href="https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker" />
    <extensions>
      <geotracker:meta>
        <geotracker:length>1452.43</geotracker:length>
        <geotracker:duration>187191</geotracker:duration>
        <geotracker:creationtime>2026-04-22T13:53:33Z</geotracker:creationtime>
        <geotracker:activity>0</geotracker:activity>
      </geotracker:meta>
    </extensions>
    <trkseg>
      <trkpt lat="35.93039" lon="0.22171833">
        <ele>242.2</ele>
        <time>2026-04-22T13:53:44Z</time>
        <extensions>
          <geotracker:meta c="2.18" s="0.58" />
        </extensions>
      </trkpt>
      <trkpt lat="35.93035167" lon="0.22180167">
        <ele>242.3</ele>
        <time>2026-04-22T13:53:46Z</time>
        <extensions>
```

**Figure III.9 :** Ouverture d'un fichier GPX Geotracker dans Chrome sur PC

A partir d'une commande utilise l'outil exiftool pour géotagger un ensemble de photos JPEG à partir d'un fichier GPX, en tenant compte d'un décalage temporel entre l'horloge de la caméra et celle du GPS. Cette opération permet d'inscrire automatiquement les coordonnées GPS de chaque photo dans ses métadonnées EXIF, ce qui rend ensuite possible de les afficher avec précision sur une carte dans des logiciels de gestion de photos ou de navigation. [20]

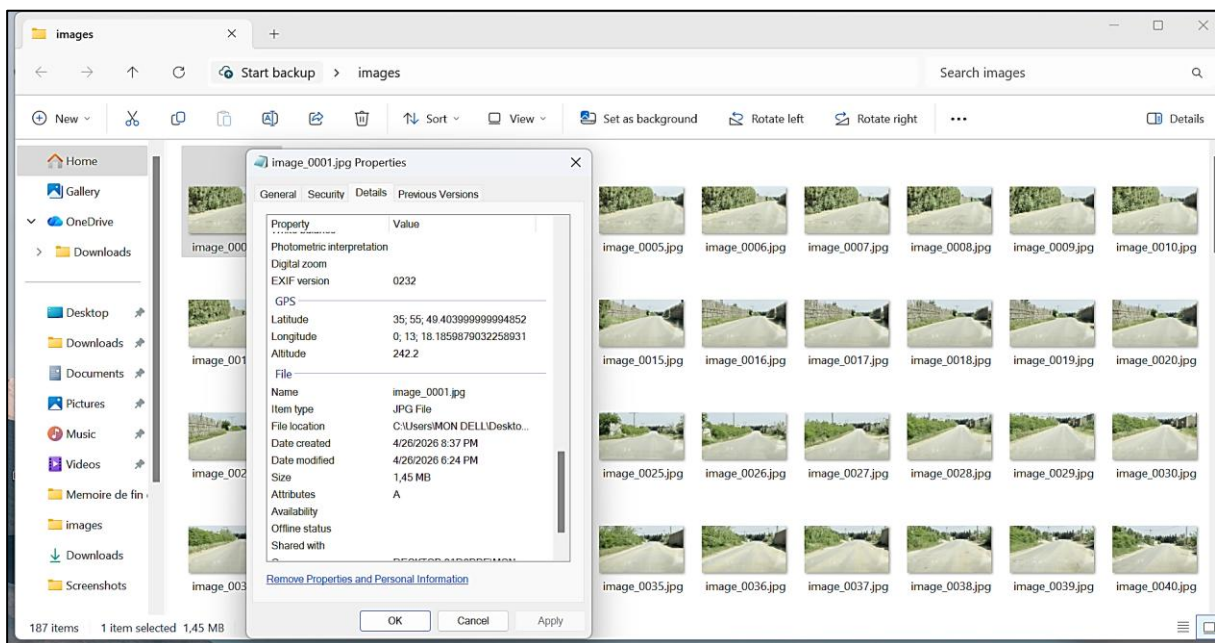
Le paramètre **-overwrite\_original** indique à exiftool de modifier directement les fichiers JPG d'origine, sans créer de copie. Cela signifie que chaque image du dossier « images » sera mise à jour en place, avec les nouvelles informations GPS ajoutées ou modifiées dans ses métadonnées. Cette option est pratique lorsque l'on dispose déjà d'une sauvegarde des fichiers, car toute modification est alors permanente.

L'option **-geotag "22\_avr.\_2026\_14\_53\_33.gpx"** permet de lier les photos à une trace GPS contenue dans le fichier GPX spécifié. Ce fichier contient une série de points GPS associés à des horodatages. exiftool lit l'heure de prise de vue de chaque photo (DateTimeOriginal), recherche dans le GPX la position la plus proche à cet instant, puis insère les coordonnées

(latitude, longitude, altitude) dans les balises EXIF GPS de la photo correspondante.[20],[21]

Le paramètre "**-geosync**" sert à corriger un décalage horaire entre l'horloge de la caméra et celle utilisée pour enregistrer le fichier GPX. Exiftool applique donc ce décalage lors de la recherche de la bonne position dans le GPX, cela est essentiel lorsque les deux appareils n'avaient pas leur heure parfaitement synchronisée ou lorsque le fuseau horaire du GPX diffère de celui de la caméra.[20]

Enfin, l'expression **images/\*.jpg** indique que la commande doit être appliquée à tous les fichiers JPG présents dans le dossier d'images. exiftool traite alors chaque image de manière séquentielle, en ajoutant ou mettant à jour les champs GPS dans leurs métadonnées. Une fois l'opération terminée, chaque photo contiendra les coordonnées GPS associées à son heure de prise de vue, ce qui permet de relier chaque image à la trace GPX synchronisée et de visualiser sa position à partir des propriétés de l'image, comme indiqué dans la figure III.10 ci-dessous :



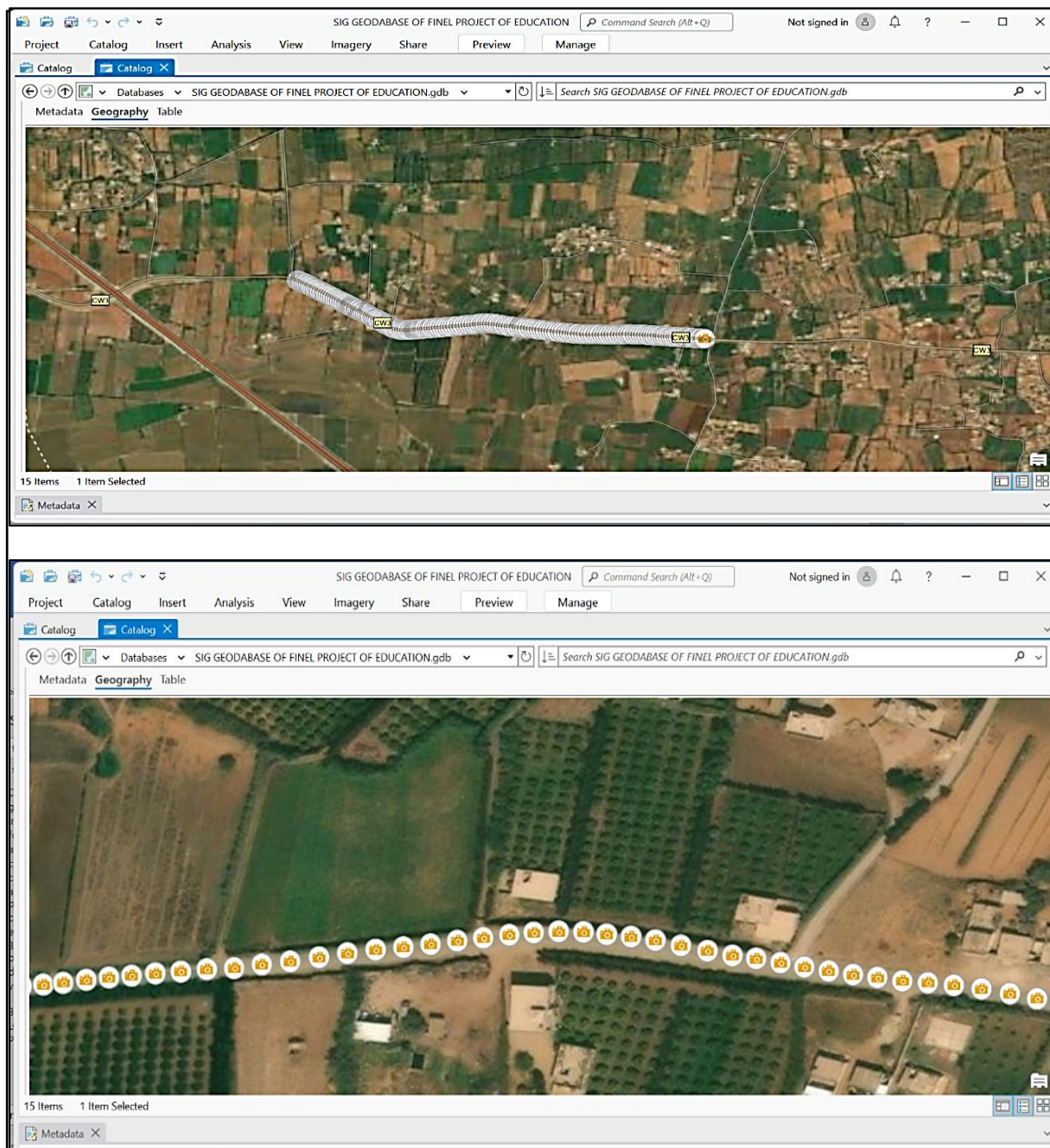
**Figure III.10 :** Affichage des coordonnées GPS dans les propriétés des images

Ainsi, on obtient des images géolocalisées, prêtes à être utilisées pour le géoréférencement dans ArcGIS Pro ou dans tout autre logiciel SIG.

### III.4 INTEGRATION DANS LOGOCIEL SIG « ARCGIS PRO »

Dans ArcGIS Pro, les images géolocalisées ont été intégrées sous forme de *feature class* enrichie par des attachements, afin de conserver le lien entre chaque entité et son fichier associé. Pour réaliser cette opération, une jointure a été effectuée à l'aide de la

commande **Special Join**, ce qui a permis d'associer automatiquement les éléments de la table attributaire aux fichiers correspondants. Cette méthode facilite l'organisation des données dans le système d'information géographique, tout en assurant une consultation simple et rapide des images liées à chaque entité. Ainsi, les données sont structurées de manière cohérente et deviennent directement exploitables pour la visualisation, l'analyse spatiale et les opérations de géoréférencement dans ArcGIS Pro.[24] Comme illustre la figure :



**Figure III.10 :** Résultats du géoréférencement des images géolocalisées dans ArcGIS Pro

Toutes les figures étant désormais géoréférencées sous ArcGIS Pro, un simple clic sur un point de type « Image » permet d'afficher l'image complète associée. Cette fonctionnalité facilite leur consultation et leur réutilisation dans des travaux futurs, comme l'illustre la Figure II.11 ci-après :



**Figure III.11 :** Visualisation des images géolocalisées dans la geodatabase sous ArcGIS pro

### **III.5 LIMITES DE CE TRAVAIL**

#### **III.5.1 Limites méthodologiques et conceptuelles:**

Ce chapitre propose une chaîne complète d'acquisition et d'alimentation de données géographiques, allant de la mise en place du dispositif jusqu'à l'intégration finale dans le système d'information géographique. Néanmoins, ce travail présente plusieurs limites d'ordre méthodologique, technique et pratique qui en restreignent la portée et limitent sa reproductibilité immédiate dans d'autres contextes ou à une échelle plus large.

La méthodologie développée dans ce chapitre repose sur un certain nombre de choix conceptuels et opérationnels qui, bien qu'adaptés au contexte du projet, présentent des limites non négligeables. Les processus d'acquisition, de traitement et d'intégration des données ont été conçus pour répondre à des objectifs spécifiques (par exemple la production de traces GPS, de cartes thématiques ou de couches SIG actualisées), ce qui limite leur portée générale et leur transposition directe à d'autres problématiques ou zones d'étude.[41]

Enfin, le chapitre s'inscrit dans une logique de retour d'expérience pratique plutôt que de cadre théorique complet, ce qui limite sa portée conceptuelle. Certaines limites implicites (notamment liées aux paradigmes de modélisation spatiale, aux choix de représentation

cartographique ou aux approches de qualité des données) ne sont pas explicitement discutées, car elles dépassent le cadre opérationnel visé par ce travail

### **III.5.2 Limites liées à intelligence artificielle :**

L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'inventaire des dégradations routières présente plusieurs contraintes techniques et méthodologiques. Les performances des modèles d'apprentissage profond dépendent fortement de la qualité, de la diversité et du volume des données d'entraînement disponibles. Un nombre insuffisant d'images annotées ou des données non représentatives peuvent réduire considérablement la précision des résultats obtenus. [12],[5]

### **III.5.3 Limites liées à la modélisation 3D et à la photogrammétrie :**

Les techniques de modélisation 3D et de photogrammétrie offrent des représentations détaillées des infrastructures routières, mais leur mise en œuvre demeure soumise à plusieurs limites. Le traitement photogrammétrique produit en effet des volumes de données très importants, notamment lors de la génération d'orthophotographies à haute résolution, de nuages de points denses ou de modèles numériques 3D, ce qui exige des capacités de stockage élevées ainsi qu'une puissance de calcul significative. Par ailleurs, l'intégration de ces données 3D dans un environnement SIG peut accroître la complexité de la géodatabase et ralentir certaines opérations d'analyse spatiale, en particulier lorsque les jeux de données sont volumineux ou organisés en plusieurs niveaux de résolution.[14]

A decorative border in a dark red color, styled like a scroll. It has rounded corners and a vertical strip on the left side that looks like a scroll's edge. The text is centered within this border.

# **CHAPITRE IV : EXPLOITATION ET ANALYSE DES DONNÉES**

# **CHAPITRE IV : EXPLOITATION ET ANALYSE DES DONNÉES**

## **IV.1 INTRODUCTION**

Après la conception et l'implémentation de la géodatabase, l'étape suivante consiste à exploiter les données structurées afin d'en extraire des informations pertinentes pour la gestion des infrastructures routières. Cette exploitation repose principalement sur des analyses spatiales et le développement d'indicateurs permettant de caractériser l'état des chaussées.

L'intégration des données dans un environnement SIG permet de transformer des données brutes en informations exploitables, facilitant ainsi la prise de décision et l'optimisation des stratégies de maintenance routière [41], [42]. Dans ce contexte, la géodatabase développée constitue un support central pour l'analyse et la valorisation des données collectées.

## **IV.2 ANALYSE SPATIALE DES DEGRADATIONS**

### **IV.2.1 Distribution spatiale des dégradations :**

L'intégration des dégradations sous forme d'entités géographiques (points ou polygones) permet leur visualisation directe dans un environnement SIG. Cette représentation offre une première lecture de la distribution spatiale des défauts le long des tronçons étudiés.

L'analyse visuelle met en évidence une répartition non homogène des dégradations, caractérisée par la présence de zones fortement affectées et d'autres relativement peu dégradées. Cette variabilité spatiale est cohérente avec les observations faites dans plusieurs études sur la dégradation des chaussées, où les défauts sont fortement influencés par des facteurs locaux tels que le trafic, les conditions climatiques et la qualité des matériaux [43], [44].

Ainsi, la représentation spatiale constitue une première étape essentielle dans la compréhension du comportement des infrastructures routières.

### **IV.2.2 Analyse de densité des dégradations**

Afin d’approfondir l’analyse spatiale, une méthode de densité de type *Kernel Density* a été appliquée aux données de dégradations. Cette méthode permet de transformer une distribution discrète de points en une surface continue représentant la concentration des défauts.

L’analyse de densité met en évidence des zones à forte concentration de dégradations, souvent appelées “zones critiques”, qui nécessitent une attention particulière en termes de maintenance. Ce type d’analyse est largement utilisé dans les systèmes de gestion routière pour identifier les sections prioritaires et optimiser les interventions [45], [6].

Par ailleurs, l’utilisation de la densité spatiale permet de dépasser les limites d’une analyse ponctuelle en offrant une vision globale et synthétique de l’état du réseau routier.

### **IV.3 DEVELOPPEMENT D’INDICATEURS D’ETAT DES CHAUSSEES**

L’évaluation de l’état des chaussées nécessite la mise en place d’indicateurs quantitatifs permettant de synthétiser les informations issues des données collectées. Ces indicateurs jouent un rôle central dans les systèmes d’aide à la décision en fournissant des mesures objectives de la dégradation [47].

#### **IV.3.1 Indice de densité des dégradations (IDD)**

Un premier indicateur, appelé indice de densité des dégradations (IDD), a été défini afin de quantifier le nombre de défauts rapporté à la longueur du tronçon.

$$\text{IDD} = \text{Nd} / \text{L}$$

Où :

**Nd** : représente le nombre total de dégradations,

**L** : la longueur du tronçon en kilomètres.

Cet indicateur permet une évaluation rapide de l’état des tronçons. Un IDD élevé traduit une forte concentration de dégradations, indiquant un état dégradé de la chaussée. Ce type d’indicateur est couramment utilisé dans les approches simplifiées d’évaluation des réseaux routiers [48].

Cependant, l’IDD présente une limite importante, car il ne prend pas en compte la gravité des dégradations.

### IV.3.2 Indice pondéré de dégradation (IPD)

Afin d'intégrer la gravité des défauts, un indice pondéré de dégradation (IPD) a été proposé.

$$\text{IPD} = \sum (\text{Gi} \times \text{Si}) / \text{L}$$

Où :

**Gi** : représente le niveau de gravité.

**Si** : la surface ou l'importance de la dégradation.

**L** : la longueur du tronçon.

Cet indice permet une évaluation plus réaliste de l'état de la chaussée en tenant compte non seulement du nombre de dégradations, mais également de leur intensité. Des approches similaires sont utilisées dans les systèmes avancés de gestion de chaussées, notamment dans le calcul d'indices composites [47], [48].

L'IPD constitue ainsi un indicateur plus pertinent pour la priorisation des interventions de maintenance.

### IV.3.3 Classification des tronçons

Les indices calculés ont été utilisés pour classer les tronçons en différentes catégories d'état. Cette classification repose sur des méthodes statistiques telles que la classification naturelle (*Natural Breaks – Jenks*) ou les quantiles.

Trois classes principales ont été définies :

- Bon état.
- État moyen.
- État dégradé.

Cette classification permet de simplifier l'interprétation des résultats et de faciliter la prise de décision. Elle constitue une étape essentielle dans les systèmes de gestion routière, où la hiérarchisation des interventions est nécessaire pour optimiser l'allocation des ressources [42], [45].

## IV.4 PRODUCTION CARTOGRAPHIQUE

La géodatabase développée permet la production de cartes thématiques facilitant l'interprétation des résultats. Ces cartes constituent un outil essentiel pour la visualisation et la communication des informations.

Parmi les cartes produites, on distingue :

- La carte de répartition des dégradations,
- La carte de densité,
- La carte des indices (idd et ipd)
- La carte de classification des tronçons.

Ces représentations cartographiques permettent de synthétiser des informations complexes sous une forme visuelle facilement interprétable. L'utilisation des SIG pour la production de cartes thématiques est largement reconnue comme un outil efficace d'aide à la décision dans le domaine de la gestion des infrastructures [41], [42].

#### **IV.5 DISCUSSION DES RESULTATS**

Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de la structuration des données à travers une géodatabase. En effet, l'intégration des données dans un environnement SIG a permis de réaliser des analyses spatiales avancées et de développer des indicateurs pertinents pour l'évaluation des chaussées.

L'analyse de densité a permis d'identifier des zones critiques nécessitant une intervention prioritaire, tandis que les indices IDD et IPD ont offert une quantification objective de l'état des tronçons. Ces résultats confirment l'importance de l'intégration des SIG dans les systèmes de gestion routière, comme souligné dans plusieurs travaux récents [43], [46].

Ainsi, la géodatabase ne se limite pas à un simple outil de stockage, mais constitue un véritable outil d'analyse et d'aide à la décision.

#### **IV.6 PERSPECTIVES D'EXPLOITATION**

À ce stade du mémoire, les indices IPD (Indice de Parsement et de Dégradation) et IDD (Indice de Détérioration de la Déformation) sont calculés manuellement à partir des observations de terrain et des images géolocalisées. Les perspectives d'exploitation visent à automatiser ce calcul et à intégrer les résultats directement dans la géodatabase conçue pour la gestion des données routières. Cette automatisation sera assurée par des scripts Python (ArcPy

sous ArcGIS Pro) qui lisent les entités de la géodatabase (points d'observation, tronçons, attributs de fissures, déformations, etc.),[24]

À plus long terme, cette structuration des données pourrait contribuer au développement de systèmes avancés tels que les jumeaux numériques routiers, permettant une gestion proactive et optimisée des infrastructures [47].

#### **IV.8 VALIDATION SCIENTIFIQUE**

Afin de valider la pertinence des indicateurs proposés, une analyse comparative qualitative a été menée. Les zones identifiées comme critiques par l'indice IPD coïncident avec les zones de forte densité mises en évidence sur les cartes à noyau (Kernel), ce qui confirme la cohérence spatiale des résultats. Cette validation croisée, recommandée dans les études récentes combinant systèmes d'information géographique (SIG) et indicateurs de dégradation, renforce la robustesse et la fiabilité des conclusions tirée.[49]

#### **IV.9 TABLEAU RÉALISTE**

Le tableau IV.1 résume les principaux indicateurs de dégradation calculés pour chaque segment. Ces résultats permettent d'évaluer l'état des chaussées et de les classer selon leur niveau de dégradation.

**Tableau IV.1 : Analyse des niveaux de dégradation des chaussées**

| <b>Tronçon</b> | <b>Longueur (km)</b> | <b>Nb dégradations</b> | <b>IDD (def /km)</b> | <b>IPD</b> | <b>Classe</b> |
|----------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------|---------------|
| T1             | 1.45                 | 45                     | 31.03                | 31.03      | Moyenne       |
| T2             | 2.39                 | 30                     | 12.55                | 25.10      | Moyenne       |
| T3             | 1.08                 | 40                     | 37.04                | 148.15     | Très dégradée |
| T4             | 0.81                 | 15                     | 18.52                | 55.56      | Dégradée      |

## **IV.10 INTERPRETATION**

Les résultats montrent une forte variabilité spatiale de l'état des chaussées. Les tronçons T3 et T4 présentent des valeurs élevées de l'IPD, confirmant leur état critique. Cette hiérarchisation est cohérente avec les approches utilisées dans les systèmes de gestion routière, où les interventions sont priorisées en fonction d'indices composites.

## **IV.11 VALIDATION PAR COHÉRENCE SPATIALE**

Les zones présentant les valeurs les plus élevées de l'IPD coïncident avec les zones de forte densité identifiées par l'analyse Kernel, ce qui confirme la pertinence des indicateurs proposés. Cette cohérence spatiale constitue une forme de validation indirecte largement utilisée dans les approches SIG. [49]



**CHAPITRE V :**  
**PERSPICTIVE IA et 3D**

# CHAPITRE V : PERSPECTIVE IA et 3D

## V.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente une évolution des systèmes géospatiaux basée sur l'intégration de l'intelligence artificielle et de la modélisation 3D. Cette approche vise à améliorer l'analyse, l'interprétation et l'exploitation des données spatiales dans un contexte marqué par l'augmentation des volumes de données et la complexité des besoins décisionnels. L'intelligence artificielle permet d'automatiser les tâches de détection, de classification et d'analyse des données géospatiales, tandis que la modélisation 3D offre une représentation plus réaliste et intuitive des phénomènes spatiaux. L'intégration de ces technologies constitue ainsi une évolution importante des systèmes d'information géographique traditionnels, en renforçant les capacités de visualisation, d'analyse et d'aide à la décision [22],[23]

## V.2 SCHEMA DESCRIPTIF DE L'ARCHITECTURE CIBLE DU PROJET

L'association de l'intelligence artificielle et de la modélisation 3D constitue une évolution majeure dans le domaine des sciences géospatiales. D'une part, l'IA permet d'automatiser la détection, la classification et l'extraction d'informations à partir de données complexes ; d'autre part, la 3D améliore la compréhension spatiale en offrant une représentation plus réaliste des objets et des phénomènes observés. Cette complémentarité renforce la capacité des systèmes géospatiaux à produire des résultats exploitables, même lorsque les volumes de données sont importants ou hétérogènes [24]. Comme illustre la figure V.1 ci-dessous :

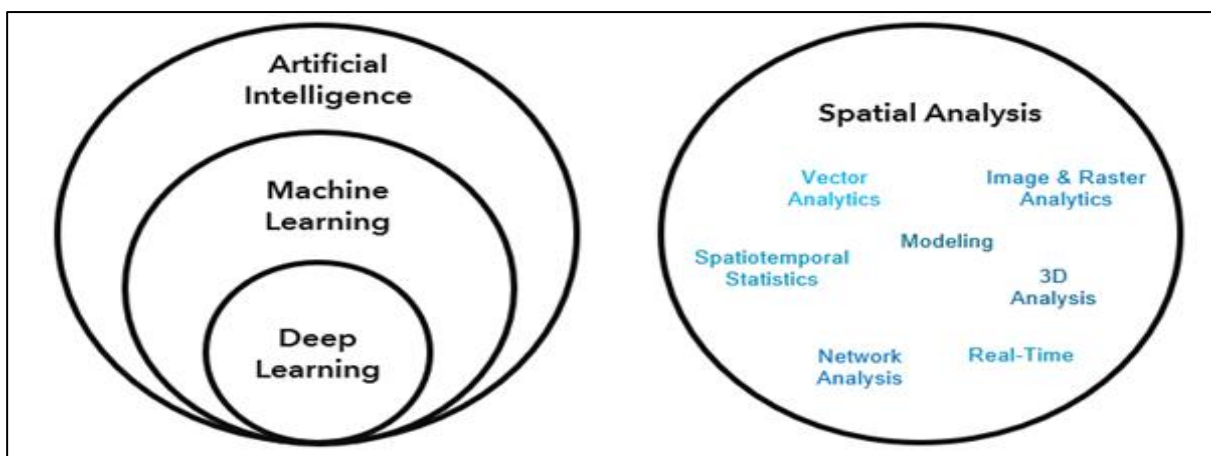


Figure V.1 : IA, apprentissage automatique, apprentissage profond et analyse spatiale

### **V.2.1. Perspective de l'intelligence artificielle :**

L'intelligence artificielle occupe aujourd'hui une place déterminante dans l'exploitation des données géospatiales. Elle permet en effet d'automatiser le traitement des images, d'identifier des objets ou des anomalies et d'extraire des informations pertinentes à partir de volumes importants de données. Dans le domaine des infrastructures routières, cette capacité est particulièrement utile pour la détection des dégradations de chaussée à partir d'images acquises sur le terrain. L'IA améliore ainsi la rapidité du diagnostic, réduit les interventions manuelles et renforce la fiabilité des résultats obtenus [26]

À partir des images, les algorithmes de vision par ordinateur et de **Deep Learning** peuvent reconnaître différentes formes de désordres, telles que les fissures longitudinales, les fissures transversales, le faïençage ou les nids-de-poule, puis les classer selon leur nature et leur intensité. L'intégration de la géolocalisation permet ensuite d'associer ces informations à leur position exacte sur le réseau routier, ce qui facilite la cartographie des dégradations et la priorisation des opérations de maintenance [27]

### **V.2.2. Perspectives de la photogrammétrie « 3D » :**

La photogrammétrie 3D occupe aujourd'hui une place essentielle dans l'évolution des méthodes de représentation et d'analyse spatiale, en raison de sa capacité à transformer des images bidimensionnelles en modèles tridimensionnels précis et exploitables. Fondée sur les principes de la vision stéréoscopique et de la perspective, elle permet de reconstruire la géométrie d'un objet ou d'un terrain à partir d'images acquises sous différents angles, avec un niveau de détail adapté aux besoins de la mesure, de la cartographie et du suivi des structures [28]

Sur le plan méthodologique, la photogrammétrie 3D constitue une technique de reconstruction spatiale particulièrement pertinente dans les domaines où l'accès direct aux objets est difficile, coûteux ou risqué. Les progrès récents des capteurs numériques, des drones et des capacités de calcul ont considérablement amélioré sa précision, sa rapidité d'exécution et son accessibilité. Elle permet désormais de produire des nuages de points, des maillages 3D et des orthophotographies qui servent de base à des analyses géométriques et spatiales de plus en plus fines.[29]

Les perspectives de cette technologie sont particulièrement prometteuses dans le contexte des approches intelligentes et automatisées. En effet, la photogrammétrie 3D tend à se

combiner avec l'intelligence artificielle afin d'améliorer la lecture des scènes, la détection des objets et l'extraction d'indicateurs utiles à la décision. Cette convergence entre photogrammétrie, SIG et IA ouvre la voie à des systèmes plus performants, capables de produire une information spatiale plus riche, plus rapide et plus directement exploitable.[30]

### **V.3 LES RELATIONS ENTRE CES TECHNOLOGIES ET LA GEODATABASE**

La géodatabase sert de support central pour stocker les images géolocalisées, les objets spatiaux, les attributs descriptifs et les résultats issus du traitement. Dans votre cas, puisque les images sont déjà géolocalisées et intégrées, la géodatabase devient la base de référence pour relier chaque image à son emplacement exact, à son état et à son évolution dans le temps.[31],[32].

#### **V.3.1.Relation avec l'IA :**

L'intelligence artificielle intervient ensuite pour détecter automatiquement les dégradations à partir des images ou des modèles 3D, puis pour les classer et les caractériser. Les résultats obtenus peuvent être enregistrés dans la géodatabase sous forme d'entités, d'attributs ou d'indicateurs d'état, ce qui facilite leur consultation, leur suivi et leur exploitation dans le processus de décision. Ainsi, la géodatabase ne stocke pas seulement les données brutes, mais aussi les résultats d'analyse [33]

#### **V.3.2.Relation avec la photogrammétrie 3D :**

La photogrammétrie 3D transforme les images en produits géospatiaux exploitables, tels que les nuages de points, les ortho mosaïques, les modèles de surface et les maillages tridimensionnels. Ces données peuvent ensuite être intégrées dans la géodatabase afin de structurer l'information et de soutenir l'analyse spatiale du projet routier. On passe ainsi d'une simple collection d'images à une base géographique organisée et directement exploitable [34]

### **V.4 L'ARCHITECTURE CIBLE**

L'architecture cible du système repose sur une chaîne de traitement intégrée associant les images géolocalisées, la photogrammétrie, l'intelligence artificielle et la géodatabase SIG.

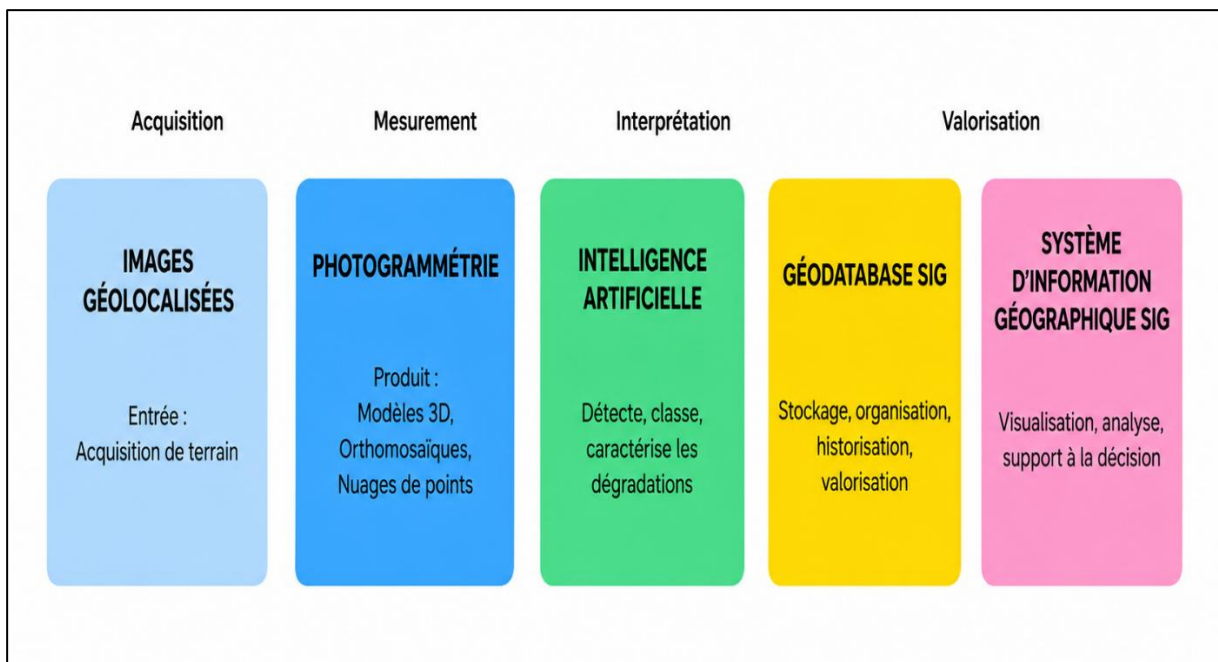
La photogrammétrie permet d'obtenir des mesures fiables à partir de photographies et de produire des modèles 3D, des ortho mosaïques et des nuages de points exploitables dans un

SIG. Les images acquises sur le terrain constituent donc la donnée d'entrée du processus, puis sont transformées en produits géospatiaux structurés capables d'alimenter l'analyse du projet routier [35]

Dans cette chaîne, l'intelligence artificielle intervient pour détecter, classer et caractériser automatiquement les dégradations visibles sur les images ou sur les produits 3D. Elle transforme les observations visuelles en informations analytiques structurées, pouvant être intégrées dans la géodatabase sous forme d'entités spatiales, d'attributs descriptifs ou d'indicateurs d'état. La géodatabase joue alors un rôle central, puisqu'elle assure le stockage, l'organisation, l'historisation et la valorisation des données produites, tout en facilitant leur interrogation et leur exploitation spatiale [36]

Ainsi, cette organisation permet de passer d'une simple collection d'images à une base géographique structurée, directement mobilisable pour la visualisation, l'analyse et l'aide à la décision. L'articulation entre photogrammétrie, IA et géodatabase offre donc une approche cohérente et opérationnelle, dans laquelle la donnée est d'abord mesurée, puis interprétée et enfin valorisée dans un système d'information routier intégré.[36],[37],[38]

La figure V.2 présente le schéma cible du projet, mettant en évidence le rôle central de la géodatabase développée sous ArcGIS Pro ainsi que l'intégration future de la photogrammétrie et de IA pour l'analyse automatisée des dégradations routières.



**Figure V.2 : Schéma descriptif de l'architecture cible du projet**

## V.5 CONCLUSION

En définitive, ce chapitre a souligné la portée stratégique de l'articulation entre l'intelligence artificielle, la photogrammétrie 3D et la géodatabase dans l'évolution des systèmes géospatiaux appliqués au domaine routier. Cette convergence technologique permet de structurer, d'enrichir et de valoriser les données de terrain au sein d'un dispositif intégré, plus apte à soutenir l'analyse, la visualisation et l'aide à la décision. Elle ouvre ainsi des perspectives méthodologiques solides pour le suivi et l'interprétation des dégradations, tout en confirmant le rôle central de la donnée géolocalisée dans les approches contemporaines de gestion des infrastructures.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce projet a proposé et mis en œuvre une méthodologie intégrant les Systèmes d'Information Géographique (SIG) afin d'améliorer la gestion des infrastructures routières, en s'appuyant sur la conception d'une géodatabase opérationnelle automatisée sous ArcGIS Pro. Dans un contexte marqué par les limites des inspections visuelles traditionnelles, notamment leur coût élevé, leur subjectivité et leur difficulté d'extension, la méthode développée, fondée sur l'acquisition d'images à l'aide d'un smartphone, leur géoréférencement et leur intégration dans un environnement SIG, a démontré sa pertinence pour la cartographie et le suivi des dégradations de chaussée.

Le géoréférencement précis des images s'est révélé déterminant pour garantir la cohérence spatiale des données et permettre des analyses spatio-temporelles fiables. L'architecture de la géodatabase conçue assure la centralisation, la normalisation et l'accessibilité des informations recueillies lors des campagnes d'inspection, tout en constituant une base structurée pour l'intégration d'algorithmes d'analyse automatique, notamment pour la détection, la classification et la quantification des dégradations.

L'utilisation de Python et d'ArcPy sous ArcGIS Pro a permis d'automatiser la conception de la géodatabase, renforçant ainsi l'efficacité, la cohérence et la fiabilité du modèle de données. Cette approche a optimisé l'exploitation des résultats d'auscultation routière et constitue une base méthodologique solide pour les développements futurs du projet.

Les résultats expérimentaux et les évaluations réalisées montrent que l'outil développé améliore la localisation des anomalies, simplifie le suivi temporel des défauts et fournit un support décisionnel pertinent pour la priorisation des opérations de maintenance. Par ailleurs, l'approche adoptée demeure compatible avec plusieurs extensions futures, telles que l'intégration de modèles d'apprentissage profond plus performants, l'obtention de mesures fiables à partir de photographies, la production de modèles 3D, ainsi que le développement de modules d'aide à la décision fondés sur des indicateurs de criticité routière.

En conclusion, ce mémoire contribue à la modernisation des pratiques de gestion des réseaux routiers en proposant une solution pratique, structurée et évolutive pour la collecte, le traitement et l'analyse spatiale des données d'inspection. Les perspectives ouvertes par ce travail sont prometteuses pour un déploiement à plus grande échelle et pour l'enrichissement de la plateforme par des fonctionnalités d'analyse prédictive et de visualisation 3D avancée, renforçant ainsi l'efficacité et la durabilité des opérations de maintenance routière.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Haas, R., Hudson, W. and Zaniewski, J. (1994) Modern Pavement Management. Krieger Publishing Company, Malabar.
- [2] Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fifth Revised Edition\ Miller & Bellinger, 2014).
- [3] Deep learning-based road damage detection and classification for multiple countries\ (Maeda et al., 2018; Zhang et al., 2023).
- [4] Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master ; Dégradation des routes en Algérie Diagnostic – causes et solution\ Par : DAHAM Eddine et GHEZAL Amel
- [5] Mémoire de fin d'études de master académique\ Détection automatique des dégradations de chaussée souple par Deep Learning : Application de YOLOv8 sur le tronçon routier de 9Km SIDI ALI – Sidi Lakhdar\ HALIMA SALEM Kawthar en 24 /06/2025
- [6] Les pathologies de voirie\Tp demain
- [7] Projet de fin d'études : Préparation d'une Géodatabase SIG pour La cartographie et le suivi de l'état de dégradation des chaussées\par : MEDJADJI Imane et SIDI YKHLEF Nadia
- [8] File geodatabases\Arcgis pro\esri
- [9] Design a Geodatabase\ Rasu Muthurakku, Enterprise Solutions Architect \ Consultan
- [10] Auscultation et diagnostic de l'état des voies, Aximum
- [11] Rapport de stages pratique de thème entretien et diagnostic des réseau routier\DTP mostaganem
- [12] <https://blog.alliantech.com/> Détection d'objets par IA avec classification par algorithmes : le futur, c'est maintenant
- [13] Road Surface Analysis : l'IA pour détecter les dégradations de la route, CONSTRUCTIONBTP le LE 19 JUIN 2024
- [14] <https://s3engineering.net/> Méthodes d'intégration des données de relevé 3D dans les systèmes d'information géographique (SIG
- [15] Qu'est-ce qu'un Modèle Conceptuel de Données (MCD) ? [Définition & avantages] \cartelis
- [16] PDF Géo Tracker\GOBE\_CHEMAINS
- [17] Aide à la gestion de l'infrastructure routière\ perspectives IA
- [18] Fiche technique apple 17 pro max
- [19] Embedded Image & Movie Timestamps & Dates
- [20] Guide to using ExifTool to correct the time, rename, and geotag your photos
- [21]-geosync and -globalTimeShift not used when using -geotag
- [22] Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889.
- [23] Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4), 8–36.

- [24] Esri, *ArcGIS Pro documentation*.
- [25] AI4GEO, *AI at the service of 3D geospatial mapping*
- [26] Vialytic\ Diagnostic de voirie et de chaussée par Intelligence Artificielle
- [27] Viapix\ Smart processing
- [28] Qu'est-ce que la photogrammétrie\artec 3D
- [29] Comparative analysis of 3D photogrammetry modeling software packages for drones survey Hinge, L.; Gundorph, J.; Ujang, U.; Azri, S.; Anton, F.; Rahman, A. Abdul
- [30] Randonnée. L'application est gratuite et téléchargeable dans le Play Store
- [31] ArcGIS Pro, *Photos géolocalisées vers points*.
- [32] Gestion de données 3D\esri
- [33] HAL-Cnam, Apport de la photogrammétrie et de l'intelligence artificielle à la détection des zones amiantées sur les fronts rocheux\ « Philippe CAUDAL.
- [34] Méthodes d'intégration des données de relevé 3D dans les systèmes d'information géographique (SIG)\S3D engineering
- [35] ArcGIS Pro. *Qu'est-ce que la photogrammétrie ?* Documentation en ligne, 2024.
- [36] Mémoire de recherche : L'inspection et la détection des anomalies structurelles et électriques en utilisant l'intelligence artificielle\par : ABDELHAK MEHADJIBIA
- [37] Comment la vision par IA améliore la détection des défauts sur les lignes de production\ Ultralytics (2026)
- [38] définition de la geodatabase \ Dictionnaire SIG \Esri
- [39] Géoréférencement, définition et explication \aquaportail
- [40] FFmpeg, l'utilitaire ultime pour le traitement de vos fichiers vidéo
- [41] Bruno et al., 2022. GIS-Based Methodology for Road Management Using Low-Cost Sensors. Sensors.
- [42] Pascucci et al., 2025. LiDAR and GIS Integration for Road Monitoring. Remote Sensing.
- [43] Hoang & Nguyen, 2019. Mobile Mapping Systems for Pavement Distress Detection. Applied Sciences.
- [44] Zhang et al., 2017. GIS-Based Pavement Condition Analysis. Journal of Infrastructure Systems.
- [45] Satheesan et al., 2024. GIS-Based Pavement Evaluation. ISPRS Archives.
- [46] Fakhri et al., 2021. Geospatial Analysis of Pavement Cracking. Int. J. Pavement Engineering.
- [47] Qureshi et al., 2022. Deep Learning and GIS for Pavement Condition Rating. ISPRS.
- [48] Weng et al., 2023. Machine Learning in Road Distress Detection. Transportation Research <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.008>/Automated classification and detection of multiple pavement distress images based on deep learning
- [49] ESRI. (2025). *Fonctionnement de l'outil Densité de noyau — ArcGIS Pro*. Récupéré de <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/3.5/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm>
- [50] Excel - Afficher plusieurs feuilles en même temps. Mandarine Lean

