



Rapport de stage dans le cadre de la formation professionnelle « Data Scientist »

# Recensement des ouvrages en terre

**Lore GOETHALS**

**Juillet 2025**

**Structure d'accueil :** CEREMA Est, site de Nancy  
71 Rue de le Grande Haie  
54510 Tomblaine

**Formation :** Institut des Sciences du Digital, Management & Cognition (IDMC)  
Pôle Herbert Simon  
13 Rue Michel Ney | CO40075  
54037 Nancy Cedex

**Tuteur professionnel :** M. Bakri BASMAJI

**Tuteur universitaire :** Mme Malika SMAIL



# Résumé

Ce rapport de stage s'inscrit dans le cadre de la formation certifiante "Parcours vers la Data Science" dispensée par l'Institut des Sciences du Digital, Management et Cognition (IDMC) de l'Université de Lorraine. Le stage a été réalisé au sein du Cerema Est, un établissement public d'expertise technique et scientifique, sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de la Cohésion des territoires.

L'objectif principal de ce stage était de développer une méthode automatisée pour recenser les ouvrages en terre de remblai et de déblai sur les axes routiers, en utilisant les données altimétriques fournies par l'IGN. Cette mission vise à améliorer la gestion du patrimoine routier en élaborant une politique d'entretien adaptée, tout en garantissant la sécurité et le confort des usagers.

Le rapport présente le contexte général du stage, les besoins identifiés, les opportunités du projet, et les objectifs spécifiques. Il décrit également les démarches exploratoires et les méthodes utilisées pour traiter et analyser les données, ainsi que les outils et technologies employés. Le développement du script Python, qui est au cœur de la méthodologie, est détaillé, avec une description des différentes étapes de traitement des données.

Les résultats obtenus sont analysés et discutés, et le rapport se clôt sur une conclusion générale qui dresse le bilan de cette expérience professionnelle, qui a permis de confronter des compétences théoriques à une problématique réelle et concrète, ancrée dans les enjeux d'entretien, d'optimisation et de sécurité du réseau routier.

# Table des matières

Résumé.....	2
Table des matières.....	3
1. Introduction générale.....	5
2. Contexte.....	6
2.1. Le Cerema.....	6
2.2. Besoins.....	7
2.3. Les ouvrages en terre.....	7
2.4. Opportunités.....	8
3. Objectifs.....	10
4. Démarches préalablement réalisés.....	11
4.1. Données utilisées.....	11
4.2. Méthodologie.....	11
4.3. Défis rencontrés et questions ouvertes.....	12
5. Méthodologie et algorithmes utilisées.....	13
5.1. Étude des données disponibles.....	13
5.1.1. Modèles numériques de terrain (MNT).....	13
5.1.1.1. BD ALTI® :.....	13
5.1.1.2. RGE ALTI® :.....	13
5.1.1.3. LIDAR HD.....	15
5.1.1.4. Comparaison des deux MNT :.....	17
5.1.2. Représentation des routes.....	18
5.1.2.1. BD TOPO®.....	18
5.1.3. Autres données nécessaires.....	18
5.1.3.1. Ouvrages d'art.....	18
5.1.3.2. Zones d'entrée et de sortie.....	18
5.2. Outils et technologies.....	18
5.3. Développement du code Python.....	19
5.3.1. Main « détecteur d'ouvrages ».....	19

5.3.2.	Get data functions .....	20
5.3.3.	Profile analyzer.....	20
5.3.4.	Segments constructor .....	21
5.3.5.	Ouvrage selector.....	22
5.3.6.	Main Profile Constructor.....	23
5.4.	Limites et points d'amélioration .....	23
5.4.1.	Modélisation du terrain naturel.....	23
5.4.2.	Validation des résultats .....	23
6.	Résultats et discussion .....	24
7.	Conclusion .....	25
8.	Annexes .....	26

# 1. Introduction générale

Ce stage s'inscrit dans le cadre de la formation certifiante "Parcours vers la Data Science" dispensée par l'Institut des Sciences du Digital, Management et Cognition (IDMC), composante de l'Université de Lorraine. Il représente une opportunité concrète de mobiliser les compétences acquises en science des données dans un contexte appliqué.

Le stage a été réalisé au sein de l'unité géotechnique du Cerema, un établissement public d'expertise technique, scientifique et d'innovation. Ce cadre a offert une immersion dans des problématiques liées à l'analyse et à l'exploitation de données spatiales à des fins d'aménagement du territoire.

Le chapitre 2 présente le contexte général du stage, à travers une description du Cerema, l'organisme d'accueil, ainsi qu'une analyse des enjeux, des besoins identifiés et des opportunités du projet. Dans le chapitre 3, nous développerons plus en détail les objectifs spécifiques du stage.

Le chapitre 4 retrace les démarches exploratoires et les premières étapes du projet, afin de poser les bases de la méthodologie. Le chapitre 5 est consacré à la description des méthodes et algorithmes mis en œuvre. Il détaille l'étude des données, les outils et technologies employés, le développement du code, ainsi que les éventuelles limitations rencontrées et les pistes d'amélioration identifiées.

Le chapitre 6 expose les résultats obtenus et en propose une analyse critique. Enfin, le rapport se clôt sur une conclusion générale, qui dresse le bilan de cette expérience professionnelle.

## 2. Contexte

### 2.1. Le Cerema

Le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) est un établissement public français<sup>1</sup>. Il est placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de la Cohésion des territoires. Le Cerema accompagne les collectivités territoriales et les acteurs économiques dans leurs projets de transition écologique et de cohésion des territoires. Il développe des méthodes et outils opérationnels pour répondre aux besoins des territoires. Le Cerema est reconnu pour son expertise en ingénierie, évaluation, recherche et développement, et joue un rôle clé dans l'amélioration des infrastructures routières en France, garantissant sécurité et durabilité.



Il y a six domaines d'action au sein du Cerema :

- expertise et ingénierie territoriale ;
- bâtiment ;
- mobilités ;
- **infrastructures de transport** ;
- environnement et risques ;
- mer et littoral.

Le Cerema – Dter Est est une des neuf directions territoriales du Cerema. Elle intervient sur le territoire de la région Grand Est. Cette présence territoriale permet aux directions de développer des connaissances spécifiques aux problématiques et contextes locaux.

J'ai été accueilli au sein de l'Agence de Nancy, située à Tomblaine, dans le groupe EEVPI (Groupe interrégional d'Études et d'Essais de Voies et Plateformes d'Infrastructures), dont la gestion est assurée par M. Laurent Sylvestre. Le groupe EEVPI est à son tour composé de quatre activités, réunies en deux champs, et un pôle national<sup>2</sup> :

- Le champ d'activité **géotechnique**, sous la responsabilité de M. Bakri Basmaji : contient les activités géotechniques, de vibration, de terrassement, de matériaux et économie circulaire, et d'audits de carrières. Sa mission consiste à réaliser des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage, d'expertise, de méthodologie et d'audit sur les champs de la préservation des ressources naturelles et l'économie circulaire.

---

<sup>1</sup> Site web : [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

<sup>2</sup> Mémoire technique : Assistance technique et contrôles extérieurs sur la voirie et les ouvrages métropolitains (Métropole Grand Nancy – Cerema) / Janvier 2022

- Le champ d'activité **chaussées**, sous la responsabilité de M. Germain Brun : contient les activités d'études d'entretien de chaussées et études de matériaux bitumineux. L'activité « Études Matériaux Bitumineux » assure une assistance technique et un contrôle externe sur les chantiers. L'activité « Études d'entretien » vise à analyser des sections de chaussées afin de proposer des solutions d'entretien ou de réhabilitation, à partir d'essais réalisés in situ. L'équipe est également impliquée dans des missions de normalisation, de méthodologie, de veille sur l'innovation, et participe à des projets nationaux ou européens.
- Le pôle national **Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques** (MTLH), sous la responsabilité de M. Dominique Saint-Eve : la mission est de réaliser des essais pour caractériser mécaniquement ces matériaux et valider les formules proposées. Il intervient également en expertise, méthodologie, normalisation et innovation, et ponctuellement sur des études de formulation pour des cas spécifiques, les applications courantes étant du ressort des entreprises routières.

Le stage a été réalisé au sein du champ d'activité géotechnique.

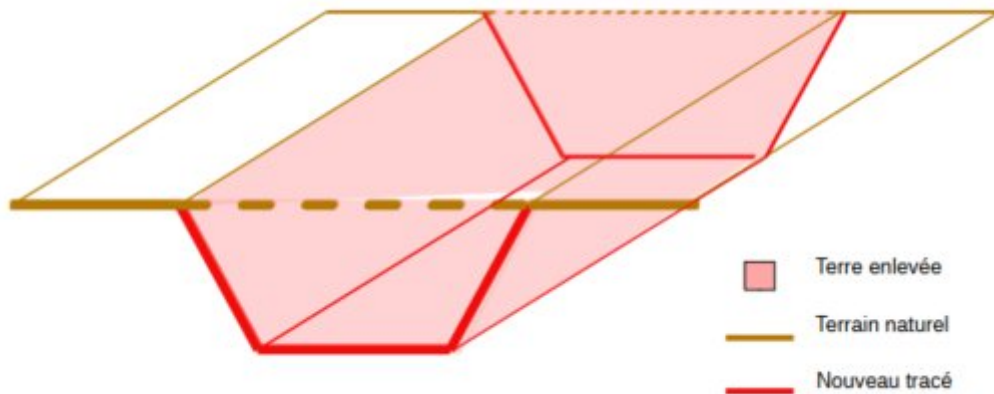
## **2.2. Besoins**

Dans le contexte du changement climatique en cours et des restrictions budgétaires imposées, la gestion du patrimoine routier devient un enjeu essentiel pour élaborer une politique d'entretien adaptée à chaque situation, notamment en ce qui concerne les chaussées et les ouvrages en terre, utilisés pour réduire les dénivelés sur le tracé d'une route. Actuellement, il n'existe pas de vision globale des ouvrages en terre du réseau routier national ou régional. Cette lacune entrave le développement d'une politique d'entretien globale et efficace.

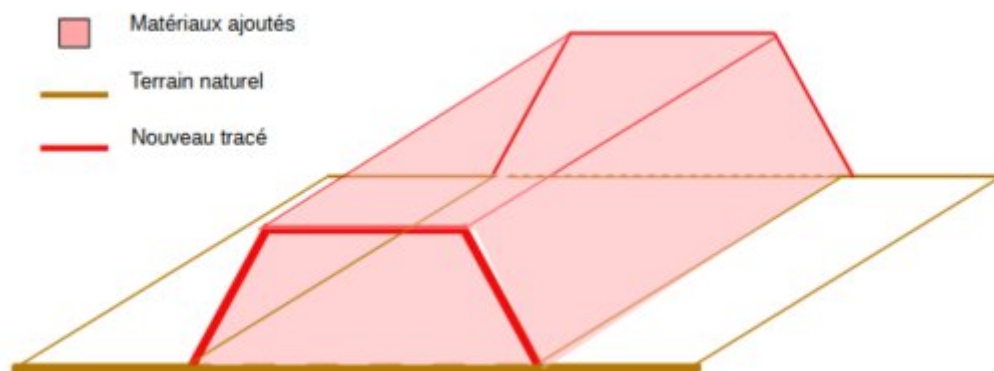
### **2.3. Les ouvrages en terre**

Les ouvrages en terre sont employés pour atténuer les dénivelés le long du tracé d'une route. Il existe deux types, notamment :

1. l'ouvrage en terre de déblai : un déblai est un volume de terre ou de matériaux enlevé du terrain naturel pour créer un creusement, une tranchée ou un abaissement du sol. Dans le cadre des routes, les déblaiements sont souvent nécessaires pour atteindre une certaine profondeur ou niveau afin de poser la structure de la route. Les déblais permettent :
  - d'assurer la stabilité de la route,
  - de réduire les pentes,
  - de garantir une meilleure gestion des eaux de ruissellement.



2. L'ouvrage en terre de remblai : un remblai est un volume de terre ou de matériaux ajouté au terrain naturel pour élever le sol à un niveau désiré. Dans la construction routière, les remblais sont utilisés pour :
  - construire des talus,
  - créer des fondations surélevées,
  - établir des plateformes pour les infrastructures routières.





À l'inverse, une route dont le tracé suit le niveau du terrain naturel s'appelle une route à profil rasant.

## **2.4. Opportunités**

De plus en plus de données sont disponibles, mais elles sont souvent sous-exploitées en raison d'un manque de temps, de compétences au sein des équipes, ou encore de ressources adéquates. Un exemple est celui des données provenant du projet LiDAR HD. Dans le cadre de ce programme, l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) diffuse des données altimétriques acquises par LiDAR haute densité sur l'ensemble du territoire français. Ces données présentent un grand potentiel d'utilisation dans divers domaines, tels que la gestion des risques naturels, l'aménagement du territoire, ou encore la planification urbaine ou l'entretien routier. Cependant, à l'heure actuelle, ces données ne sont pas encore exploitées au sein du groupe EEVPI.

### 3. Objectifs

La mission principale de ce stage consiste à développer une méthode pour recenser automatiquement les ouvrages en terre de remblai et de déblai sur les axes routiers, basée sur les données altimétriques diffusées par l'IGN. Les connaissances ainsi obtenues pourront ensuite être utilisées dans l'élaboration d'une stratégie d'entretien. Cette stratégie viserait à prolonger la durée de vie des ouvrages en terre et à limiter les travaux de maintenance routière, tout en garantissant la sécurité et le confort des usagers.

La mission couvre plusieurs sous-aspects :

- Explorer les données actuellement disponibles et évaluer leur pertinence, leurs avantages et leurs limites ;
- Définir les concepts en concertation avec les experts techniques, les agents du Cerema ;
- Développer une méthode pour recenser les ouvrages en terre, avec les spécifications suivantes :
  - Attribuer une identification/libellé aux sections d'ouvrage en terre afin de les repérer plus facilement,
  - Attributs demandés pour chaque ouvrage : le type (remblai/déblai), les coordonnées de début et de fin, le côté de la route, la hauteur maximale, la hauteur moyenne, la pente maximale, la pente moyenne, la longueur de l'ouvrage ;
- Rédiger un rapport avec les statistiques descriptives les plus pertinentes.

## 4. Démarches préalablement réalisées

Une analyse pilote a déjà été réalisée par Adrien, un collègue qui désormais ne travaille plus au Cerema. Il est parvenu à élaborer des profils topographiques avec une visualisation sous ArcGIS afin de détecter les points en déblai, en remblai ou ayant un profil rasant. La route étudiée concernait la section de l'A31 traversant le département de la Meurthe-et-Moselle.

### 4.1. Données utilisées

Les données utilisées étaient :

- Les altitudes : modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN ([RGE ALTI® | Géoservices](#)), avec une résolution de 5 m. Le RGE ALTI® décrit la forme et l'altitude normale de la surface du sol (format raster).
- La route A31 : polygones du BD TOPO de l'IGN ([BD TOPO® | Géoservices](#)). La BD TOPO® est une description vectorielle 3D des éléments du territoire et de ses infrastructures.

### 4.2. Méthodologie

Avec un espacement de 500 m entre les profils, des profils d'altitude de 100 m de long sont déterminés perpendiculairement au vecteur de la route A31, avec une granularité de 5 m. Pour classer ces profils en déblai, remblai ou profil rasant, la différence de hauteur est calculée entre deux points du profil : un situé à 5 m du centre et un autre à 20 m du centre du vecteur, dans les deux directions de la route.

Si cette différence de hauteur dépasse un seuil positif de 3 m, le profil est classé comme remblai. À l'inverse, si elle est inférieure au seuil négatif de -3 m, le profil est classé comme déblai. Enfin, si la différence de hauteur se situe entre ces deux seuils, le profil est classé comme rasant. Une visualisation graphique de chaque profil est ensuite générée.

Paramètres :

- Espacement entre profils topographiques : 500 m
- Longueur des profils : 100 m
- Espacement entre points de mesure dans un profil : 5 m
- Points pris en compte pour la classification : 5 m du centre et 20 m du centre
- Seuils de différence de hauteur utilisés : 3 m et -3 m

Le choix des paramètres était provisoire.

### **4.3. Défis rencontrés et questions ouvertes**

1. Les altitudes sont représentées par une couche raster, sur laquelle une couche vectorielle contenant les informations des routes est superposée. Le modèle doit suivre la trajectoire de la route afin de générer des profils à des distances fixes, perpendiculaires à son tracé. Pour effectuer les calculs, il doit d'abord identifier le point central de la route. Actuellement, l'alignement des profils n'est pas toujours optimal.
2. Définition des paramètres : la classification des profils dépend fortement des seuils définis, ainsi que de la distance entre les deux points pris en compte pour le calcul. Le choix des paramètres est actuellement provisoire et doit être revu.
3. Un MNT avec une granularité de 5 m est utilisé.
  - a. La granularité est relativement grande ; il sera nécessaire de tester si les résultats s'améliorent avec une granularité plus fine.
  - b. Il convient de comprendre comment les valeurs des pixels sont calculées.
4. Des propriétés supplémentaires des ouvrages doivent être calculées.

## 5. Méthodologie et algorithmes utilisés

Dans cette section, nous décrivons les méthodes et les outils utilisés pour développer une approche automatisée de recensement des ouvrages en terre de remblai et de déblai sur les axes routiers. L'objectif est de fournir une vue d'ensemble des étapes suivies, des données et technologies employées, et des considérations prises en compte pour assurer l'efficacité et la précision du processus.

### 5.1. Étude des données disponibles

Avant de plonger dans les détails techniques, il est essentiel de comprendre les données utilisées dans cette étude.

#### 5.1.1. Modèles numériques de terrain (MNT)

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation numérique de la surface du sol sous forme d'un maillage de points avec des altitudes. Il décrit exclusivement le relief, sans inclure les éléments situés au-dessus du sol, tels que la végétation ou les bâtiments. Les routes sont représentées comme faisant partie de la surface du sol. Cela signifie que leur altitude correspond à celle du terrain naturel, sans tenir compte des structures artificielles comme les ponts ou les tunnels, car ils ne font pas partie du relief naturel. Les ponts et les viaducs n'étant pas modélisés dans un MNT, une route sur un pont ou viaduc peut être "projetée" sur le relief en contrebas.

Le MNT est la meilleure option pour déterminer les profils d'une route, car il fournit une représentation fidèle du terrain naturel, sans inclure les éléments artificiels comme les bâtiments ou la végétation. Au contraire, un modèle numérique de Surface (MNS) fausserait les profils altimétriques en intégrant des éléments non-pertinents. Un MNT sera utilisé pour déterminer les altitudes avec précision. Il existe plusieurs MNT de la France, développés au sein de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). Leurs caractéristiques sont décrites ci-dessous.

##### 5.1.1.1. **BD ALTI® :**

La version 2.0 de la BD ALTI® est un modèle numérique de terrain en maillage, conçu pour représenter le relief en France. Il décrit la forme du sol et son altitude à une échelle moyenne, en s'appuyant sur la version 1.0 de la BD ALTI®, mise à jour à partir des données du RGE ALTI®. Il est disponible avec des résolutions de 25 m, 75 m et 250 m. Cependant, cette résolution n'étant pas adaptée à la question actuelle, l'utilisation de la BD ALTI® est exclue.

##### 5.1.1.2. **RGE ALTI® :**

Le RGE (Référentiel à Grande Échelle) ALTI® est un MNT en maillage qui représente la forme et l'altitude normale de la surface du sol à grande échelle. Il est disponible avec des résolutions

de 1 m et 5 m et couvre l'ensemble du territoire français. Les données sont actualisées à partir des relevés issus du LIDAR aéroporté ou de la corrélation d'images aériennes. La résolution de 1 m pourra être suffisante pour la détermination des profils topographiques des axes principaux. Analysons donc ces données plus en détail.

**Résolution et données** Le RGE ALTI® au pas de 1 m est une représentation interpolée du relief du sol sous la forme d'une grille rectangulaire régulière composée de nœuds. L'altitude de chaque nœud de cette « matrice d'altitudes » correspond à l'altitude du terrain au point défini par ce nœud. La distance entre chaque nœud est de 1 m.

Le RGE téléchargeable est composé de trois types de données :

- Un MNT maillé (raster) décrivant le relief terrestre de la France :
  - Sous la forme d'une grille rectangulaire où chaque nœud est défini par un numéro de colonne et de ligne (c,l), des coordonnées bidimensionnelles (X,Y) et une altitude Z exprimées en mètres,
  - Volume d'une dalle : 5 à 10 Mo,
- Deux couches de métadonnées (masques de qualité) :
  - Couche SOURCE qui indique la source principale des données utilisées pour calculer l'altitude d'un nœud,
  - Couche DISTANCE qui fournit une estimation de la distance (en mètres) entre le nœud analysé et le point le plus proche ayant contribué au calcul de son altitude.

**Méthode d'acquisition** L'IGN utilise différentes méthodes d'acquisition des données en fonction du type de paysage et des besoins des utilisateurs. Le LiDAR aéroporté (*Light Detection And Ranging*), un système de balayage laser permettant de mesurer la distance entre un avion et des points au sol, est privilégié pour les zones inondables, le littoral et les grands massifs forestiers. Le radar est employé pour les régions montagneuses. Quant aux autres territoires, ils sont couverts par des techniques de corrélation d'images aériennes. Lorsque ces dernières ne permettent pas d'obtenir des mesures précises sur de vastes zones, en raison de la présence de sursol (comme des massifs boisés), des données altimétriques plus anciennes sont utilisées pour compléter les informations manquantes.

Une synthèse des informations sur la méthode d'acquisition des données pour chaque dalle est présentée dans un tableau d'assemblage associé au MNT, au format Shapefile. Pour chaque dalle, le tableau indique le nombre de nœuds correspondant à chaque type d'acquisition, ainsi que d'autres données, telles que l'altitude minimale et maximale, le nombre de nœuds sans valeur, les systèmes de référence et le pas de grille. Dans la région du Grand-Est les types d'acquisition sont la corrélation et le LiDAR topographique.

**Exactitude** L'exactitude altimétrique du MNT RGE ALTI® varie en fonction de la méthode d'acquisition des données et des traitements appliqués, adaptés aux caractéristiques des zones concernées (littorales, inondables, forestières, urbaines, rurales, etc.). Pour estimer cette exactitude au niveau des nœuds, on utilise l'Écart Moyen Quadratique (EMQ).

L'EMQ est un indicateur statistique couramment employé pour évaluer la précision d'un positionnement géographique. Il mesure la dispersion des valeurs observées par rapport à la valeur réelle de référence. Plus l'EMQ est faible, plus la précision est élevée. En anglais, il correspond au Root Mean Square Error (RMSE).

Pour la région du Grand-Est :

- Grands massifs forestiers :
  - Méthode d'acquisition : LiDAR aéroporté
  - Exactitude estimée : 0,2 m
- Autres zones :
  - Méthodes d'acquisition : corrélation de photographies aériennes et ajustement des zones BD ALTI®
  - Exactitude estimée :
    - Entre 0,5 et 0,7 m pour les données issues de la corrélation
    - Entre 2 et 8 m lorsque des données altimétriques anciennes sont utilisées

#### **5.1.1.3. LIDAR HD**

L'IGN mène le programme national LiDAR HD afin de produire et de diffuser une cartographie 3D détaillée du sol et du sursol sur l'ensemble du territoire français, en utilisant des données LiDAR. Les nuages de points 3D collectés dans ce cadre sont d'abord classés en différentes catégories (sol, eau, végétation, bâtiments, ponts, sursol pérenne), puis servent à la création de modèles numériques : des MNT (modèles numériques de terrain), des MNS (modèles numériques de surface) et des MNH (modèles numériques de hauteur). Toutes les données issues de ce programme sont accessibles en open data sous licence ouverte Etalab 2.0. Comparer les caractéristiques d'un MNT issu des données LiDAR HD avec celles du MNT RGE ALTI® précédemment décrit permettra d'évaluer leurs différences et leurs atouts respectifs.

**Nuages de points bruts** L'acronyme LiDAR HD désigne le système *Light Detection And Ranging* Haute Densité. Il s'agit d'une technologie de balayage laser aéroporté qui mesure la distance entre un point d'un avion et des points au sol, en utilisant des fréquences pouvant se situer dans le domaine visible ou infrarouge. Associé à un système de balayage, à un GPS et à une centrale inertielle, ce dispositif permet d'obtenir un nuage de points géo-référencés lors de l'acquisition. On parle ici de Haute Densité, car une densité d'au moins 10 impulsions par m<sup>2</sup> est

garantie (5 impulsions par m<sup>2</sup> au-delà de 3 200 m d'altitude). La géométrie d'un point est définie par trois valeurs : la longitude (x), la latitude (y) et l'altitude (z).

Un contrôle géométrique est effectué pour garantir une **précision** minimale de 50 cm en planimétrie et de 10 cm en altimétrie. Cette précision est évaluée à l'aide de l'Écart Moyen Quadratique (EMQ), un indicateur statistique mesurant la dispersion des observations par rapport à la valeur vraie (voir ci-dessus). Les données brutes ne sont pas (plus) disponibles en ligne.

**Nuages de points classés** Les points du nuage de points initial, dits bruts, sont d'abord contrôlés puis classifiés afin d'obtenir un nuage de points classés. Au total, 11 classes sont définies, incluant notamment le sol, la végétation (basse, moyenne ou haute), les bâtiments, les surfaces d'eau, les tabliers de pont, les points virtuels, etc.

La livraison d'une dalle avec les nuages de points est constituée de :

- Données nuages de points :
  - Disponible en format binaire standard COPC.LAZ (format LAS compressé avec indexation),
  - Volume du LAZ : 150 à 500 Mo => volume du LAS : 500 Mo à 2 Go,
- Métadonnées nuage de points : 2 couches disponibles en format GeoTIFF 8 bits (raster),
- Tableau d'assemblage des dalles en format Shapefile.

**Modèles numériques de terrain** Les modèles numériques issus du LiDAR HD représentent le sol sous forme d'une grille régulière et carrée, également appelée « matrice d'altitudes ». L'altitude de chaque nœud de cette grille correspond à l'altitude du terrain définie en ce point. Comme dans le RGE ALTI®, chaque nœud est identifié par un numéro de colonne et de ligne (c, l), des coordonnées bidimensionnelles (X, Y) et une altitude Z exprimée en mètres. Le premier nœud de la grille correspond au centre du premier pixel du raster.

Chaque nœud est calculé à partir des points présents dans le pixel correspondant, en appliquant une **interpolation de type TIN** (*Triangulated Irregular Network*). Le MNT issu du LiDAR HD est dérivé des points « sol » (classe 2), « eau » (classe 9) et « points virtuels » (classe 66). Le TIN est une méthode d'interpolation utilisée pour générer un Modèle Numérique de Terrain à partir d'un nuage de points LiDAR classé. Contrairement aux modèles en grille régulière, le TIN repose sur un maillage de triangles irréguliers connectant les points retenus. Chaque triangle définit un plan incliné, permettant d'estimer la hauteur de points intermédiaires entre les sommets.

L'avantage du TIN est son adaptabilité au terrain : il densifie la triangulation dans les zones complexes (fortes pentes, ruptures de pente) et la simplifie dans les zones planes, offrant ainsi une meilleure représentation du relief qu'un modèle raster classique. Cependant, cette méthode



est plus exigeante en termes de calcul et peut générer des fichiers volumineux et plus difficiles à manipuler.

Les modèles numériques issus du LiDAR HD sont exclusivement générés à partir de données LiDAR, avec une **précision** altimétrique de 10 cm et planimétrique de 50 cm. Les paramètres de qualité intrinsèque de ces modèles n'ont pas encore été évalués et ne sont donc pas disponibles.

La livraison d'une dalle d'un modèle numérique est constituée :

- Du MNT : données altimétriques sous la forme d'une grille régulière (raster) constituée de nœuds :
  - Dimension d'une dalle : 1 km sur 1 km,
  - Nombre de nœuds en fonction du pas :
    - Au pas de 0,5 m : 2000 x 2000 nœuds => volume d'une dalle : env. 24 Mo,
    - Au pas de 5 m : 200 x 200 nœuds => volume d'une dalle : env. 0,5 Mo,
- De métadonnées nuage de points :
  - 2 couches : une carte de densité de points sol et une carte de classe,
- D'un tableau d'assemblage des dalles en format Shapefile.

Le projet LiDAR HD est toujours en cours. À ce jour, tous les nuages de points classés et leurs produits dérivés, comme les MNT, n'ont pas encore été publiés. Cependant, pour certaines zones, des MNT sont déjà accessibles, permettant d'évaluer leurs performances. Il est également possible de générer des MNT à partir des nuages de points classés déjà disponibles si les données sont bien pré-traitées. La disponibilité de tout le territoire français est prévue pour fin 2026.

#### 5.1.1.4. Comparaison des deux MNT :

	RGE ALTI®	LiDAR HD (MNT)	Remarques
<i>Résolution</i>	1 m	0,5 m	Les 2 résolutions suffiront
<i>Volume par dalle</i>	5 à 10 Mo	Env. 24 Mo (MNT) Nuages de points : 150 à 500 Mo	Volume pour LiDAR fois 3 à 4 comparé au RGE ALTI®, mais faisable ; Nuages de points : beaucoup plus lourds
<i>Exactitude</i>	Entre 0,2 m (pour les points LiDAR) et jusqu'à 8 m (pour les données anciennes)	Pas disponible ; Précision altimétrique de min. 10 cm	Meilleure exactitude pour le MNT LiDAR HD
<i>Disponibilité</i>	Disponible pour la France entière	Disponible pour certaines zones spécifiques (disponibilité total prévu fin 2026)	LiDAR HD pas encore disponible pour tout le territoire français et encore plus de prétraitement nécessaire

### **5.1.2. Représentation des routes**

Pour déterminer les profils topographiques d'une route, il ne suffit pas de disposer des données altimétriques ; les informations sur le tracé des routes sont également nécessaires.

#### **5.1.2.1. BD TOPO®**

À cet effet, la BD TOPO®, élaborée et fournie par l'IGN, a été utilisée préalablement par Adrien et pendant les premiers tests. La BD TOPO® est une description vectorielle en 3D de l'ensemble des entités géographiques et administratives du territoire français. Les objets de la BD TOPO® sont répartis en groupes thématiques, dont l'un est le groupe transport, qui inclut les infrastructures du réseau routier.

Les données sont disponibles en plusieurs formats (shapefile, GeoPackage et PostgreSQL). Le format Shapefile est souvent utilisé, mais il est moins flexible que le format GeoPackage, qui est également plus efficace en termes de stockage. Pour notre usage, les deux formats sont équivalents, mais le format GeoPackage est le plus facile à utiliser.

La sous-catégorie « Route numérotée ou nommée » de la catégorie « Transport » représente l'ensemble d'une route en un ou deux vecteurs, mais ne contient pas toutes les informations nécessaires pour le calcul des propriétés des ouvrages en terre. Par conséquent, nous utilisons également les données de la sous-catégorie « Tronçon de route », où nous avons accès à des propriétés supplémentaires, comme le nombre de voies et la largeur de la route.

Ces données sont accessibles en open data sous la licence ouverte Etalab.

### **5.1.3. Autres données nécessaires**

#### **5.1.3.1. Ouvrages d'art**

La BD TOPO® de l'IGN contient des informations sur les ouvrages d'art, notamment les ponts. Ces informations sont réparties dans deux sous-catégories de la catégorie « Bâti » > « Construction surfacique » (format vecteur : polygones) et « Construction linéaire » (format vecteur : lignes). Dans les deux cas, les ponts sont caractérisés par la nature « Pont ».

#### **5.1.3.2. Zones d'entrée et de sortie**

La BD TOPO® de l'IGN contient également des informations sur les zones d'entrée et de sortie des autoroutes, dans la catégorie « Transport » > « Tronçon de route » > nature « Bretelle ».

## **5.2. Outils et technologies**

Pour traiter et analyser ces données, nous avons utilisé plusieurs outils et technologies. Le langage de programmation Python a été choisi pour sa flexibilité et sa puissance en matière de

traitement de données. Plusieurs bibliothèques Python ont été utilisées, notamment : Geopandas, RasterIO, Shapely, Requests, Math, OS, Scikit-learn, Numpy, Pandas et Matplotlib.

Pour visualiser les données, nous avons utilisé QGIS, un logiciel SIG (système d'information géographique) gratuit et open-source (sous licence GPL).

### **5.3. Développement du code Python**

Le cœur de notre méthodologie repose sur le développement d'un script Python capable de traiter automatiquement les données pour identifier les ouvrages en terre. Voici les étapes clés du traitement. Pour une documentation plus technique, nous vous recommandons de consulter la documentation technique ou le fichier Readme associé au code.

#### **5.3.1. Main « détecteur d'ouvrages »**

Le fichier « `main_ouvrages_detector.py` » est le point de départ pour l'utilisateur. Une fois exécuté, ce code appelle les autres fichiers Python qui doivent se trouver dans le même dossier. Le modèle numérique du terrain (MNT), nommé « *mnt.tif* » doit être placé dans un dossier nommé « data », lui-même situé dans le même répertoire que le fichier principal.

Après le lancement, en cliquant sur l'icône ►, le code demande à l'utilisateur de saisir le code de la route (par exemple, A33). Un dossier de sortie est alors créé avec le nom « `output_codedelaroute` ». Ensuite les paramètres de seuil pour la classification en remblai ou déblai sont spécifiés.

Après la saisie du code de la route, le programme suit trois étapes principales :

1. Analyse des profils de la route : Il utilise les coordonnées de la route et un MNT avec les données altimétriques. Pour chaque mètre de la route, le « ProfileAnalyzer » détermine si la route est en déblai, en remblai ou en profil rasant.
2. Construction des segments : Le « SegmentConstructor » prend tous les points classifiés et connecte ceux qui sont adjacents et de même classification pour créer des segments d'ouvrage en terre.
3. Nettoyage des segments : Les segments sont affinés pour connecter ceux qui sont brièvement interrompus, supprimer ceux qui sont trop courts et masquer les zones où se trouvent les ponts. Étant donné que les ponts et viaducs ne sont pas modélisés dans un MNT et peuvent être projetés sur le relief en contrebas (voir [5.1.1.](#)), ces zones peuvent fausser les résultats en indiquant un remblai ou déblai inexistant.

Les résultats obtenus sont sauvegardés dans le fichier de sortie créé au début. Ils peuvent être visualisés en ouvrant le fichier (format GeoPackage, extension .gpkg) dans un logiciel SIG, comme QGIS ou ArcGIS.

### 5.3.2. Get data functions

Le fichier « `get_data_functions.py` » contient toutes les fonctions nécessaires pour charger automatiquement les données de l'IGN via leur API. Ces fonctions permettent de rechercher et de récupérer certaines données directement depuis les serveurs de l'IGN, évitant ainsi de les télécharger manuellement au préalable.

Cette automatisation réduit les risques d'erreurs qui peuvent survenir lorsque l'utilisateur doit fournir les fichiers manuellement, comme l'utilisation de fichiers avec une extension incorrecte, un nom inadéquat, ou des données formatées ou pré-traitées différemment. Cette approche rend également le code plus accessible pour les utilisateurs n'ayant pas de connaissances préalables.

### 5.3.3. Profile analyzer

Le programme « `ProfileAnalyzer` » examine comment une route s'intègre dans le paysage en comparant le niveau de la route avec le terrain naturel environnant. Il permet de détecter trois situations différentes :

- Remblai : la route est surélevée par rapport au terrain naturel.
- Déblai : la route est creusée dans le terrain naturel.
- Rasant : la route est au même niveau que le terrain naturel.

Pour la représentation de la route, le programme utilise les données « tronçons de route » de l'IGN, chargées automatiquement depuis leur API. Pour obtenir les données altimétriques, il consulte le modèle numérique de terrain (MNT) fourni par l'utilisateur.

Le programme prend des "photos" du terrain tous les mètres le long de la route. Pour chaque point, il trace une ligne perpendiculaire à la route, mesure les altitudes le long de cette ligne, compare l'altitude de la route avec celle du terrain naturel et calcule la pente naturelle du terrain. Le terrain naturel à l'emplacement de la route est modélisé par une régression linéaire.

Le programme produit ensuite une carte qui montre où se trouvent les remblais, déblais et zones rasantes avec des mesures précises de la hauteur des ouvrages.

Les attributs suivants sont déterminés :

La classification (remblai, déblai ou rasant),

L'altitude moyenne sur la route (zone de 6 m, 3 m de chaque côté de la ligne représentant la route),

L'altitude interpolée par la régression linéaire sur la même zone sur la route,

La différence d'altitude entre la route et le terrain naturel modélisé, calculée par la différence entre ces deux altitudes,

Le nombre de voies (attribut connu depuis les données IGN),

La largeur de la route (attribut connu depuis les données IGN),

Le code de la route,

La différence de hauteur maximale de hauteur en cas d'ouvrage (NULL si profil rasant) : l'altitude au point minimale soustraite de l'altitude au point maximale,

La pente qui caractérise l'ouvrage en cas d'un ouvrage (NULL si profil rasant) : actuellement encore trois manières de calcul :

- Pente de l'ouvrage entier : différence de hauteur maximale divisée par la distance entre le point minimal et le point maximal,
- Pente de l'ouvrage excluant les premiers et derniers mètres : commençant à une distance de 2 mètres après le point minimal et s'arrêtant à 2 mètres avant le point maximal : calculée de la même manière, en divisant la différence de hauteur de ces deux points par la distance entre eux. Cette deuxième manière de calcul est utilisée à la suite des calculs.
- Pente d'une section au milieu de l'ouvrage : calculée de la même manière, en divisant la différence de hauteur entre le point de début de la section et le point de fin de la section par la distance entre eux.

#### **5.3.4. Segments constructor**

Le programme « SegmentConstructor » prend les points analysés précédemment et les regroupe pour créer des segments qui représentent des ouvrages routiers complets, tels que des remblais ou des déblais.

Le programme utilise les points classifiés (remblai, déblai, rasant) déterminés par le programme ProfileAnalyzer, les points de repère (PR, qui sont comme des bornes kilométriques le long de la route), et le tracé de la route depuis les données « route numérotée ou nommée » fournies par l'IGN.

Le programme fonctionne comme un « connect the dots » intelligent : il suit la route mètre par mètre, et lorsqu'il trouve un point classifié (par exemple un remblai), il continue d'avancer tant qu'il trouve des points du même type. Il mesure la hauteur et la pente de l'ouvrage, et crée un segment qui relie tous ces points.

Pour chaque segment, le programme enregistre :

- Le type d'ouvrage (remblai, déblai, rasant),
- Sa longueur,
- Sa hauteur maximale et moyenne,
- Sa pente maximale et moyenne (basée sur la pente de l'ouvrage excluant les premiers et derniers mètres),
- Sa position par rapport aux points de repère,
- Un nom unique qui permet de l'identifier.

Le programme crée une carte qui montre tous les segments d'ouvrages identifiés, leurs caractéristiques principales et leur position exacte sur la route.

### **5.3.5. Ouvrage selector**

Cette classe agit comme un « nettoyeur intelligent » qui affine la liste des ouvrages routiers identifiés précédemment. Il s'assure que nous conservons uniquement les ouvrages pertinents et bien identifiés.

Le programme utilise les segments d'ouvrages créés par le programme « SegmentConstructor » et les données représentant les ponts de l'IGN, qui sont chargées automatiquement via leurs API.

Il exécute plusieurs opérations. D'abord, il « nettoie » les ponts, supprimant les segments qui se chevauchent avec des ponts, évitant ainsi de confondre un pont avec un remblai ou un déblai.

Les « bretelles », c'est-à-dire les zones d'entrée et de sortie, ne sont pas supprimées. Ces zones sont très larges, ainsi beaucoup de tronçons de route seront éliminés complètement, même si les bretelles ne faussent pas les résultats autant que les ponts, vue qu'ils sont correctement représenté dans le MNT.

Par la suite, le programme exécute un regroupement intelligent. D'abord, il sépare les remblais et les déblais en deux groupes. Pour chaque groupe, il fusionne les segments qui sont très proches (moins de 10 mètres d'écart) et calcule de nouvelles caractéristiques pour les segments fusionnés :

- Hauteur maximale et moyenne,
- Pente maximale et moyenne,
- Longueur totale,
- Points de repère de début et de fin.

Ensuite, les deux groupes sont regroupés ensemble. Puis un filtrage final est effectué pour ne conserver que les ouvrages de plus de 20 mètres de long. Ainsi, les très petits segments qui ne sont pas significatifs sont éliminés.

Le résultat final est une liste propre d'ouvrages routiers avec :

- Leur type (remblai ou déblai),
- Leurs dimensions précises,
- Leur localisation exacte,
- Leurs caractéristiques techniques (voir ci-dessus).

### 5.3.6. Main Profile Constructor

Ce module permet de générer des profils d'élévation perpendiculaires le long d'un segment routier défini par des points de repère (PR). Il facilite l'analyse topographique du terrain autour des routes.

Le programme fonctionne de manière autonome. L'utilisateur doit saisir le code de la route concernée, le point de départ (PR de départ et la distance en mètres après ce PR où l'utilisateur souhaite commencer), le point de fin (PR de fin et la distance en mètres après ce PR où l'utilisateur souhaite s'arrêter) ainsi que l'espacement (distance souhaitée entre les profils).

Les données vectorielles représentant les PR sont automatiquement chargées via leur API. Le programme utilise également les résultats de la classe `SegmentConstructor`, enregistrés lors de l'exécution du programme *main\_ouvrages\_detector.py*, ainsi que les données altimétriques fournies par l'utilisateur dans le fichier *data/mnt.tif*.

D'abord, le programme crée une ligne centrée au milieu de la route. Si celle-ci est composée de plusieurs segments, ces segments sont reliés. Les autoroutes sont modélisées par deux lignes au milieu de chaque chaussée. Pour obtenir une ligne centrée sur la route, les deux lignes sont fusionnées et une ligne centrale est générée.

Ensuite, les PR de début et de fin sont identifiés et un segment d'intérêt est extrait. Sur ce segment, des lignes perpendiculaires sont calculées à intervalles réguliers (espacement défini par l'utilisateur ou, par défaut, 25 m). Pour chaque mètre le long de ces lignes perpendiculaires, l'élévation est extraite à partir du fichier *data/mnt.tif*.

Enfin une visualisation graphique du profil d'élévation est générée et enregistrée au format *.png* dans un sous-dossier *profiles*. Le nom de chaque fichier inclut le code du PR de départ et le nombre de mètres (arrondi à la dizaine) après ce PR à l'emplacement sur la route.

### 5.3.7. Analyseur d'ouvrages

Ce script Python permet d'analyser automatiquement les ouvrages détectés sur une route (remblais, déblais, profils rasants) à partir d'un fichier *GeoPackage* généré par le traitement principal. Il calcule des statistiques (moyenne, min, max, médiane) sur la longueur, la hauteur et la pente des ouvrages, puis génère un rapport HTML lisible et illustré de graphiques.

Le fichier « selected\_ouvrages.gpkg » doit être présent dans le dossier « output\_{route} ». Le code de la route est saisi par l'utilisateur. Le fichier est ouvert et un GeoDataFrame est créé pour les analyses.

Ensuite, des statistiques sont calculées sur la longueur, la hauteur et la pente, à la fois pour l'ensemble des ouvrages et par type d'ouvrage. Des graphiques sont ensuite générés afin d'offrir une représentation plus visuelle. Enfin, un fichier CSS et un fichier HTML sont créés afin de produire un rapport au format HTML, consultable via un navigateur web.

## **5.4. Limites et points d'amélioration**

### **5.4.1. Modélisation du terrain naturel**

Actuellement, le terrain naturel est modélisé par une courbe linéaire, déterminée à l'aide d'une régression linéaire. Cette modélisation pourrait potentiellement être améliorée en utilisant d'autres modèles. Une régression linéaire présente deux limitations principales :

- Elle attribue la même importance à toutes les données pour effectuer une prédiction. Or, certains modèles, tels que les méthodes de pondération par distance, privilégient davantage les valeurs proches au détriment des plus éloignées, ce qui peut améliorer la précision locale. Néanmoins, ces modèles peuvent être moins précis lorsqu'il s'agit de représenter des relations complexes et non linéaires.
- Elle est limitée à une relation linéaire, alors que la morphologie du terrain naturel est souvent non linéaire. Des modèles plus flexibles, comme les modèles polynomiaux ou les réseaux de neurones, permettent d'ajuster les prédictions à des formes plus complexes et fidèles à la réalité du terrain. Les principaux inconvénients de ces modèles sont le risque de surapprentissage, ainsi que la quantité importante de données et de puissance de calcul requise, notamment dans le cas des réseaux de neurones.

### **5.4.2. Validation des résultats par les experts**

Afin de garantir la fiabilité et la pertinence des résultats obtenus, une phase de validation par des experts du domaine s'avère indispensable. Ces experts, tels que des ingénieurs spécialisés en modélisation du terrain ou des professionnels de l'aménagement, interviennent pour évaluer la cohérence entre les hypothèses du modèle et la réalité physique du terrain. Leurs analyses permettent également d'identifier les éventuelles limites, notamment dans les zones à forte variabilité topographique, et de proposer des améliorations méthodologiques. Cette validation experte constitue une étape cruciale pour renforcer la robustesse scientifique de la démarche et en favoriser l'applicabilité opérationnelle.



## 6. Résultats et discussion

Ci-dessus les résultats pour le A33 sont analysés. Le choix pour la route A33 a été fait pour des raisons de disponibilité des données LiDAR HD.

### 6.1. Statistiques globales

Au total, on compte 274 segments, répartis comme suit : 89 segments de type remblai (longueur moyenne de 193 m), 69 segments de type déblai (longueur moyenne de 250 m), et 116 segments de type rasant (longueur moyenne de 189 m). Les segments rasants sont les plus nombreux, bien qu'ils soient également les plus courts en moyenne. On observe aussi un léger excédent de segments en remblai par rapport aux segments en déblai, mais ces derniers présentent une longueur moyenne plus élevée.

La longueur totale des segments de type remblai s'élève à 17 208 m, celle des segments de type déblai à 17 236 m, et celle des segments rasants à 21 871 m. Le type rasant est donc le plus représenté en termes de longueur totale. La répartition des ouvrages en terre entre remblais et déblais reste globalement équilibrée, ce qui n'est guère surprenant : les matériaux extraits lors de la création des déblais sont souvent réutilisés pour la construction des remblais.

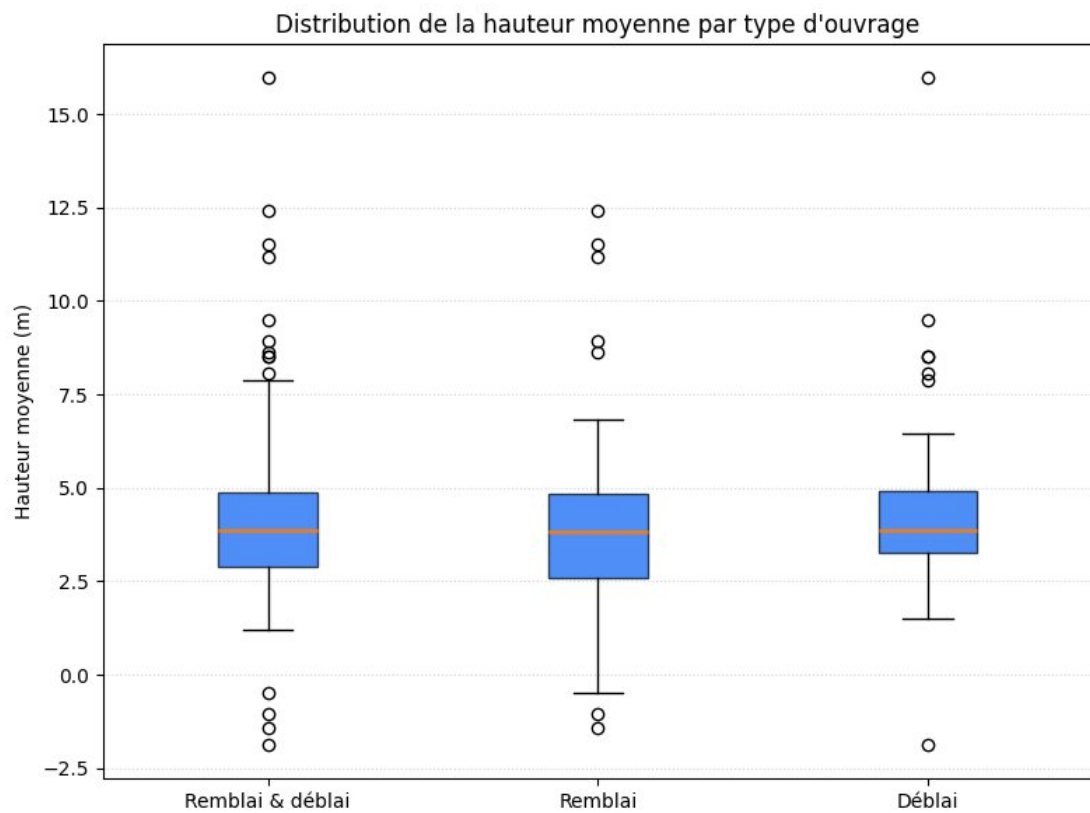
Type d'ouvrage	Nombre	Longueur
<i>Remblai</i>	89	17208 m
<i>Déblai</i>	69	17236 m
<i>Rasant</i>	116	21871 m
<b>Total</b>	<b>274</b>	<b>56315 m</b>

### 6.2. La hauteur

Les caractéristiques supplémentaires, telles que la hauteur et la pente, sont calculées uniquement pour les segments de type remblai et déblai, et non pour ceux de type rasant. On distingue la hauteur moyenne de la hauteur maximale. Pour rappel, la hauteur moyenne correspond à la moyenne des hauteurs relevées à l'ensemble des points du segment, tandis que la hauteur maximale désigne la valeur la plus élevée parmi ces points.

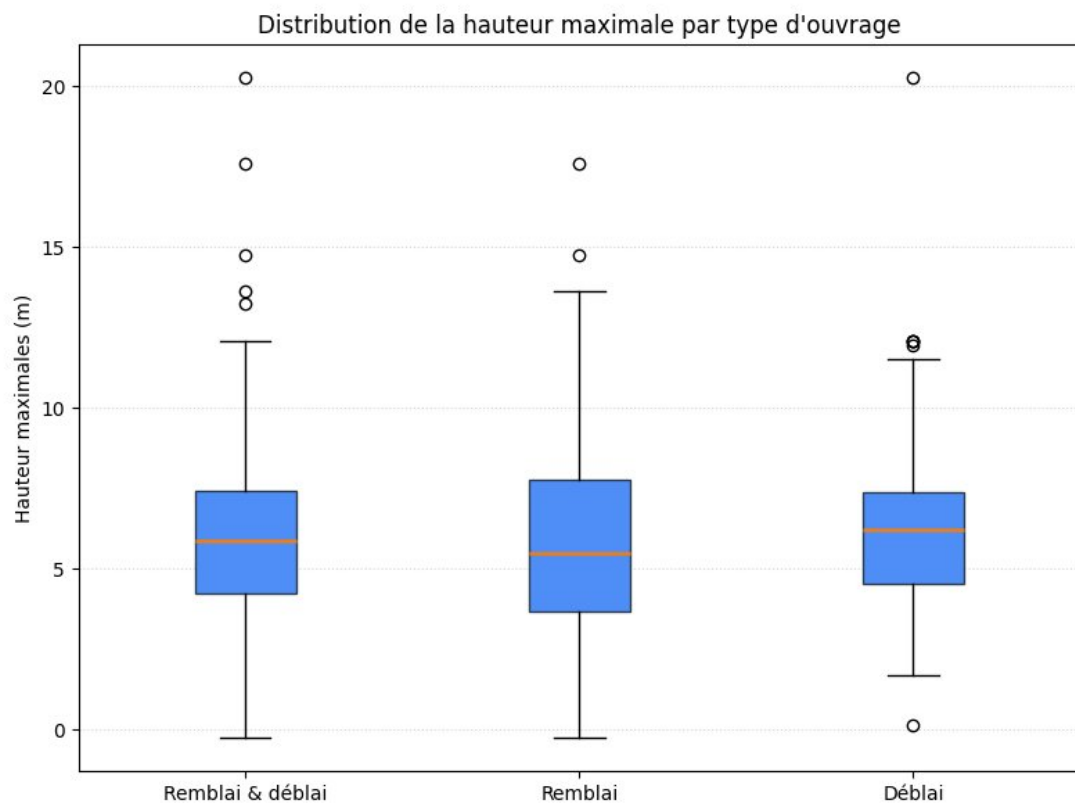
#### 6.2.1. Hauteur moyenne

Dans la figure ci-dessous, on peut voir la distribution de la hauteur moyenne pour les segments de type remblai et déblai, ainsi que les deux types ensemble. La hauteur moyenne moyenne des segments de type remblai est de 3,98 m et celle des segments de type déblai est de 4,33 m.



### 6.2.2. Hauteur maximale

Dans la figure ci-dessous, on peut voir la distribution de la hauteur maximale pour les segments de type remblai et déblai, ainsi que les deux types ensemble.



### 6.2.3. Interprétation

Parmi les segments de type **remblai**, trois (soit 3 %) présentent une hauteur *moyenne* supérieure à 10 m, tandis que 17 segments (19 %) se situent entre 5 m et 10 m. La majorité, soit 64 segments (72 %), ont une hauteur *moyenne* inférieure à 5 m, ce qui révèle une tendance générale à des hauteurs *moyennes* relativement basses. Cependant, lorsqu'on examine les hauteurs *maximales*, un léger décalage apparaît : 50 segments (56 %) affichent une hauteur *maximale* entre 5 m et 10 m, tandis que seulement 5 segments (6 %) dépassent les 10 m. En revanche, 34 segments (38 %) présentent une hauteur *maximale* inférieure à 5 m.

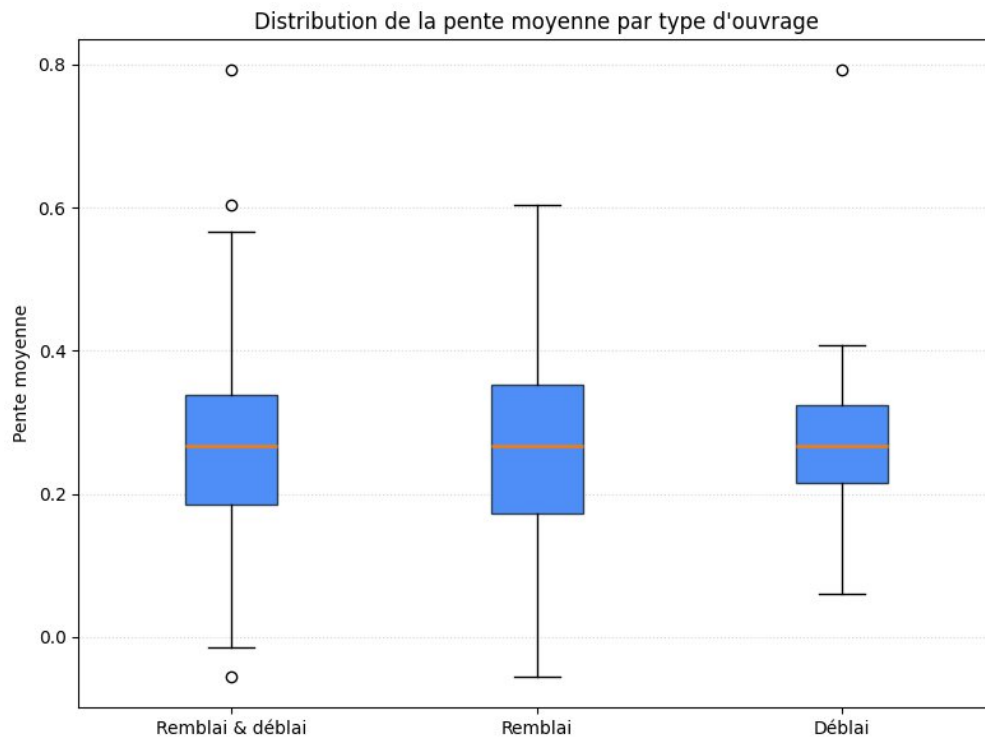
Une tendance similaire est observée pour les segments de type **déblai**. Seul un segment (1 %) dépasse les 10 m de hauteur *moyenne*, mais 10 segments (14 %) atteignent cette valeur en termes de hauteur *maximale*. Concernant la hauteur *moyenne*, 14 segments (20 %) se situent entre 5 m et 10 m, alors que la majorité – soit 54 segments (78 %) – sont en dessous de 5 m. Du côté des hauteurs *maximales*, 34 segments (49 %) se situent entre 5 m et 10 m, et 25 segments (36 %) sont inférieurs à 5 m.

## 6.3. La pente

Les pentes sont calculées pour les segments de type remblai et déblai, mais pas pour les segments de type rasant. On distingue la pente moyenne et la pente maximale. La pente est calculée de la manière suivante :  $\text{pente} = \text{hauteur} / \text{distance}$ .

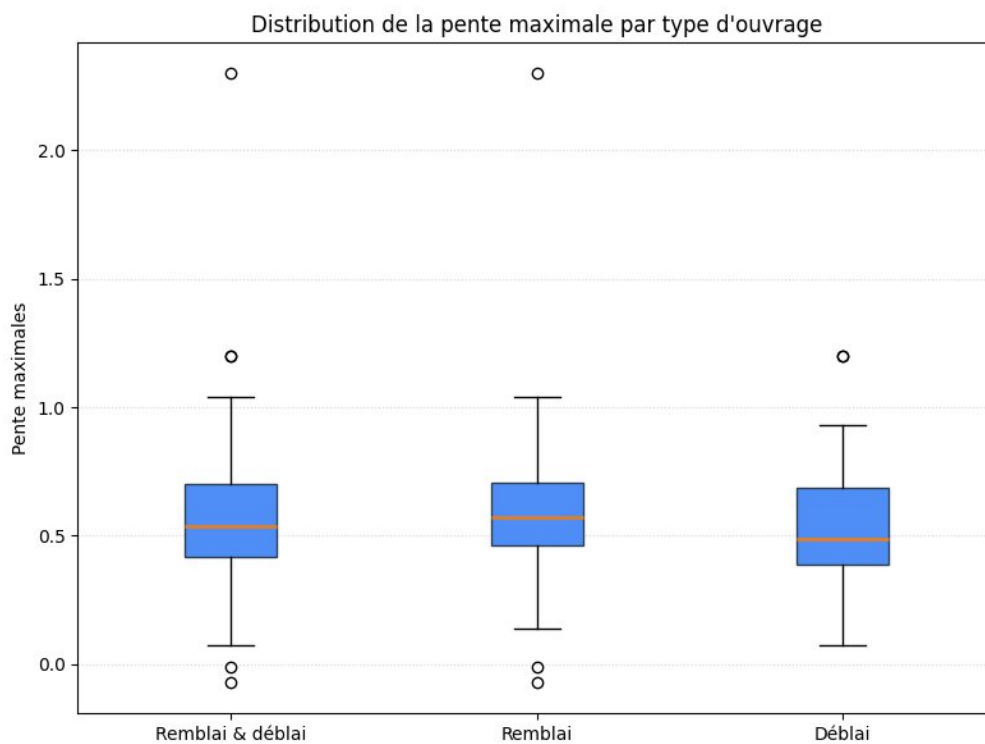
### 6.3.1. Pente moyenne

Dans la figure ci-dessous, on peut voir la distribution de la pente moyenne pour les segments de type remblai et déblai, ainsi que les deux types ensemble. La pente moyenne moyenne des segments de type remblai est de 0,27 m et celle des segments de type déblai est également de 0,27 m.



### 6.3.2. Pente maximale

Dans la figure ci-dessous, on peut voir la distribution de la pente maximale pour les segments de type remblai et déblai, ainsi que les deux types ensemble.



### **6.3.3. Interprétation**

Concernant les segments de type remblai, un seul présente une pente moyenne supérieure à 60 %, tandis que 16 segments (soit environ 18 %) se situent entre 30 % et 60 %. La majorité, soit 29 segments (environ 33 %), affichent une pente moyenne inférieure à 30 %. En revanche, les pentes maximales révèlent une répartition différente : 30 segments (34 %) atteignent une pente supérieure à 60 %, 37 segments (42 %) se situent entre 30 % et 60 %, et seuls 6 segments (7 %) présentent une pente maximale inférieure à 30 %.

Du côté des segments de type déblai, la répartition est assez comparable. Un segment dépasse les 60 % de pente moyenne, 13 (19 %) sont compris entre 30 % et 60 %, et 20 segments (29 %) affichent une pente moyenne inférieure à 30 %. En ce qui concerne les pentes maximales, on recense 20 segments (29 %) au-delà des 60 %, 34 (49 %) entre 30 % et 60 %, et seulement 6 segments (9 %) en dessous de 30 %.

Ainsi, les profils de pente des segments en remblai et en déblai montrent une répartition globale assez similaire, bien que les pentes maximales soient généralement plus marquées que les pentes moyennes.

### **6.4. Discussion globale**

La répartition équilibrée des longueurs en remblais et déblais, combinée à la modeste hauteur moyenne, témoigne d'un profil routier globalement modéré. Toutefois, la présence de hauteurs maximales et de pentes maximales significatives sur certains segments indique des points localisés de relief accentué, qui peuvent être critiques pour la stabilité ou l'entretien des infrastructures. Le traitement différencié des pentes et hauteurs selon les types permet une meilleure anticipation des besoins techniques en phase de conception ou de maintenance.

## 8. Conclusion

Ce stage au sein du Cerema Est a été une opportunité enrichissante de mobiliser les compétences acquises en science des données dans un contexte appliqué. La mission de recenser automatiquement les ouvrages en terre de remblai et de déblai sur les axes routiers a permis de développer une méthode innovante pour améliorer la gestion du patrimoine routier.

Les données altimétriques fournies par l'IGN, notamment BD TOPO® et les données LiDAR HD, ont été essentielles pour la réalisation de cette mission. L'utilisation de ces données, combinée avec des outils et technologies avancés, a permis de développer un script Python pour traiter et analyser les données. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour l'élaboration d'une stratégie d'entretien des ouvrages en terre, et peuvent être intégrés à d'autres projets en cours. Ils peuvent encore être améliorés avec une modélisation du terrain naturel plus flexible et une validation des résultats sur le terrain par les experts.

En conclusion, ce stage m'a permis de mettre en pratique les connaissances acquises en formation et de contribuer à un projet concret et utile pour la gestion du patrimoine routier.

## 9. Annexes

### 9.1. Scripts Python

1	main_ouvrages_detector.py
2	get_data_functions.py
3	profile_analyzer_viz.py
4	segments_constructor.py
5	select_ouvrages.py
6	main_profils_constructor.py
7	analyse_ouvrages.py

### 9.2. Autres documents

1	Documentation technique
2	Fichier requirements.txt
3	Fichier README
4	Analyse statistique des ouvrages de la route A33 (fichier html)
5	Fichier css pour mise en page du fichier html