



Topographie haute-résolution de la vallée de la Seine Normande

Données LiDAR et ortho-photographies 2022

Octobre 2023

Maîtrise d'ouvrage

GIP Seine-Aval



Prestataires

ALTOA / Pixair



Financeurs

GIP Seine-Aval, MRN et SMGSN



Partenaires techniques du projet

GIP ROL, LHSM, MRN



Auteurs du rapport : Eric L'Ebrellec, Nicolas Bacq

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	5
1.1. Technologie LiDAR	5
1.2. Objectifs en lien avec les missions du GIP Seine-Aval	6
1.3. Couverture géographique	7
2. ACQUISITION	8
2.1. Périodes de survols : conditions hydrologiques et de développement végétatif	8
2.2. Matériel	10
2.3. Paramètres généraux d'acquisition des données LiDAR	11
2.4. Cas particulier des zones d'interdiction de prises de vue aériennes	11
3. TRAITEMENT DES DONNEES	12
3.1. Compilation des données LiDAR des différentes phases d'acquisition	12
3.2. Traitement géométrique	13
3.2.1. Calage relatif	13
3.2.2. Calage absolu	14
3.3. Classification du semis de points	15
3.3.1. Classes standard : sol, bâti, végétation et eau	15
3.3.2. Classes particulières	16
3.3.2.1. Traitement spécifique des zones de recouvrement	16
3.3.2.2. Murets	17
3.3.2.3. Tabliers de pont	17
3.3.2.4. Ecluses	18
3.3.2.5. Eléments non pérennes	18
3.3.3. Autres classes	19
3.4. Traitement des zones en eau	20
3.5. Grilles MNT-MNE	20
3.6. Ortho-photos dites « techniques »	21
3.7. Cas particulier des zones d'interdiction de prises de vue aériennes	22
4. CONTROLE QUALITE REALISE GIP SEINE-AVAL	23
4.1. Le Semis de points	23
4.1.1. Cohérence des données	23
4.1.2. Précision altimétrique	24



4.1.3. Classification	26
4.2. Grilles MNT et MNE	28
4.3. Orthophotographie	28
5. LES DONNEES DISPONIBLES	29
6. MODALITES D'ACCES ET DROIT D'UTILISATION DES DONNEES	29
7. BILAN DU PROJET	29
ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DETAILLEES DES SCANNERS LIDAR ET CAMERAS MOBILISES	31
ANNEXE 2 : IMPORTANCE DU CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL DU MNT	32
ANNEXE 3 : COMPARAISON DES DONNEES MNT 2010/2011 ET 2022	35



1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le GIP Seine-Aval a acquis en 2011, un premier référentiel topographique haute définition de l'ensemble de la vallée de l'estuaire de la Seine (Bacq, 2013¹). Les données ont été mobilisées pour des applications dans de nombreux domaines : risque inondation, gestion des milieux aquatiques, des forêts et autres milieux naturels de la vallée de la Seine, aménagement du territoire et urbanisme ou encore archéologie.

En 2022, le GIP Seine-Aval a programmé une nouvelle campagne d'acquisition LiDAR afin d'actualiser les données. Un partenariat a été mis en place avec la Métropole Rouen Normandie (MRN) et le Syndicat Mixte de Gestion de la Seine Normande (SMGSN), deux partenaires intéressés pour couvrir l'ensemble de leur périmètre d'intervention. Cette mutualisation de moyens a permis de couvrir l'ensemble de la vallée de Seine Normande de Vernon à la Mer, étendue aux limites de la MRN. La collaboration avec le Réseau d'Observation du littoral Normand Picard (ROLNP) et Le Havre Seine Métropole, engagés dans des démarches d'observation de la topographie de leur territoire, a permis d'assurer une bonne articulation des projets d'acquisition de données.

La prestation d'acquisition et de traitement des données a été confiée à l'entreprise Altoa en collaboration avec l'entreprise Pixair pour la mise à disposition des moyens aériens.

Le présent rapport décrit les moyens, les méthodes et les résultats des phases d'acquisition, de traitement et du contrôle qualité des données. Il présente les données disponibles à la fin du projet et évoque des éléments méthodologiques utiles à leur utilisation. Une partie du contenu est directement extrait du rapport établi par ALTOA dans le cadre de la prestation qui lui a été confiée (ALTOA, 2023²).

1.1. Technologie LiDAR

La technologie LiDAR se base sur la télémétrie laser couplée à un système de géoréférencement terrestre. Elle a été développée dans les années 1990 afin de permettre des acquisitions aéroportées (avion ou hélicoptère) de données altimétriques de la surface terrestre. La mesure du temps entre l'émission d'un signal laser (proche infrarouge), sa réflexion sur la surface terrestre et sa réception depuis une position connue, permet de produire des données tridimensionnelles géoréférencées. Ces informations renseignent sur la topographie du terrain et des éléments du sursol comme le couvert de végétation ou encore le bâti avec une précision élevée.

Le système permet d'enregistrer plusieurs retours (ou échos) à chaque impulsion du laser, localisant dans l'espace les obstacles au rayonnement.

¹ Bacq N., 2013. Projet LiDAR estuaire de la Seine – Acquisition, contrôle qualité et produits disponibles. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval, 41p.

² ALTOA, 2023, Levé topographique haute définition de la vallée de l'estuaire de la Seine, Rapport d'étude pour le compte du GIP Seine-Aval, 70 p.



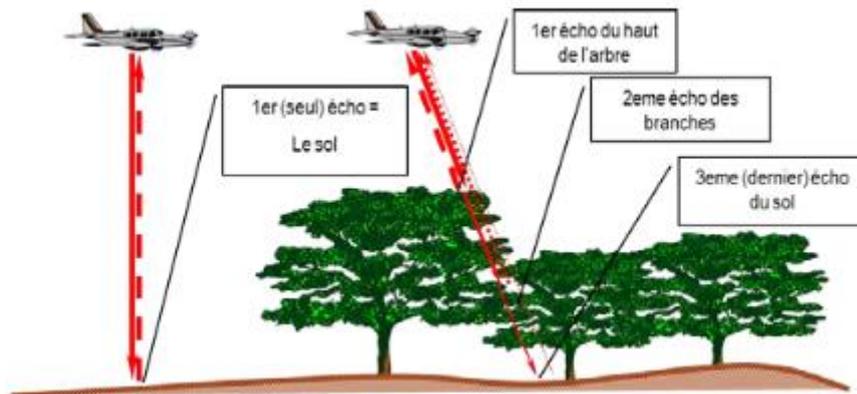


Figure 1 : Illustration de la mise en œuvre d'un LiDAR aéroporté

Le système permet ainsi de constituer un nuage de points de la surface balayée, plus ou moins dense selon les paramètres d'acquisition et les contraintes du terrain. La présence de végétation dense peut constituer un obstacle à la détection du sol par le laser. Le signal ne traversant pas l'eau, le système ne permet pas d'obtenir de données dans les environnements aquatiques (sous l'eau). Dans certains environnements littoraux, des systèmes spécifiques sont mis en œuvre (les LiDAR bathymétriques) mais ne sont pas adaptés aux milieux estuariens en raison des fortes turbidités rencontrées.

1.2. Objectifs en lien avec les missions du GIP Seine-Aval

Les missions et les thématiques d'étude du GIP Seine-Aval ont orienté la stratégie d'acquisition et de traitement des données. L'objectif de cette acquisition était de caractériser le plus précisément possible :

- La topographie et la morphologie des rives de la Seine, notamment des zones de balancement des marées ;
- La topographie et la morphologie des zones naturelles (notamment humides) et semi-naturelles (agricoles), ainsi que du réseau de drainage (ex : fossés) du lit majeur de l'estuaire ;
- La présence et la topographie des principales constructions créant des obstacles anthropiques à l'écoulement des eaux (murs, bâtiments...) ;
- Les hauteurs de végétations.



1.3. Couverture géographique

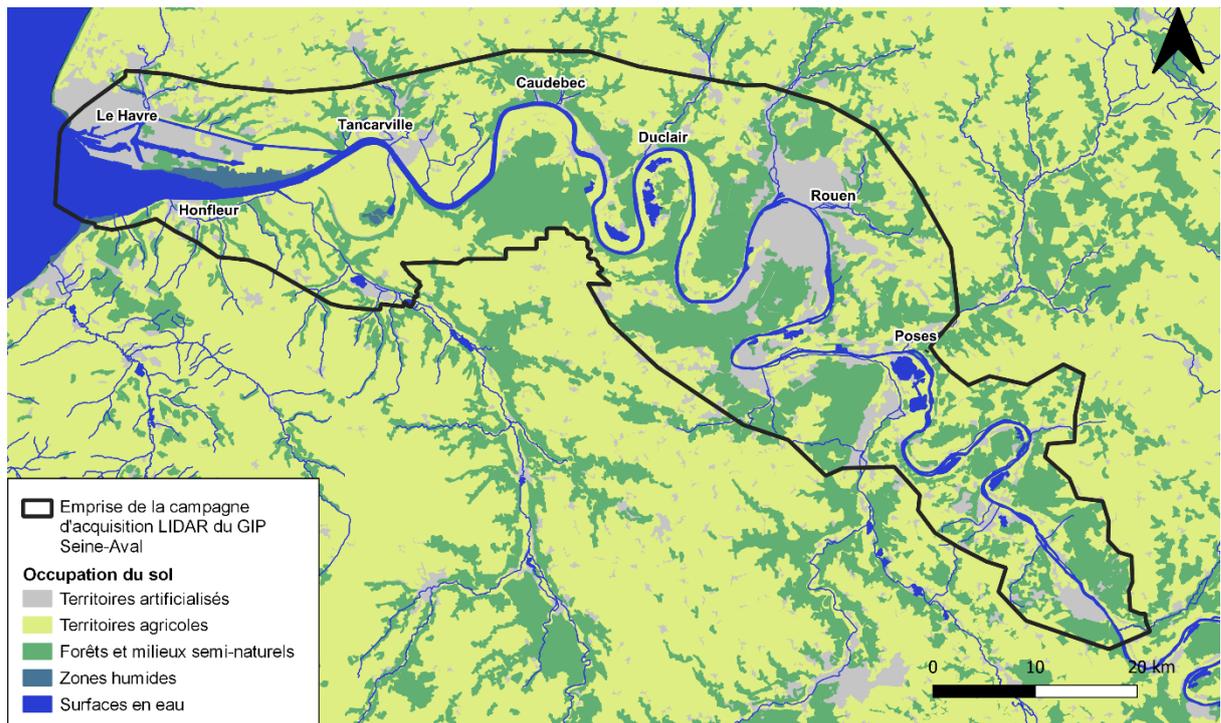


Figure 2 : emprise spatiale des données acquises

La zone couverte est définie par une enveloppe englobant les coteaux, les terrasses, la plaine alluviale, les zones riveraines ainsi que les secteurs de confluence des affluents de **la Seine en Normandie**.

Cette emprise a été ajustée pour intégrer l'ensemble du territoire de la Métropole Rouen Normandie et du Syndicat Mixte de Gestion de la Seine Normande.



2. ACQUISITION

2.1. Périodes de survols : conditions hydrologiques et de développement végétatif

La stratégie d'acquisition des données a été établie pour optimiser la détection du sol par le laser, c'est-à-dire en choisissant des périodes de survols favorisant :

- ⇒ Les niveaux d'eau de Seine les plus bas
- ⇒ Une végétation très peu développée

La stratégie se décline en 3 phases décrites dans le Tableau 1.

	Vol principal Phase 1	Vol marée basse Phase 2	Vol marée basse Phase 3
Secteur	Ensemble de l'emprise	Zones riveraines en aval du PK 278	Zones riveraines en amont du PK 278
Végétation	Hors période végétative	Hors période végétative	Début de période végétative
Débit	Débit modéré (< 500 m ³)	Débit modéré (< 500 m ³)	Débit faible (< 250 m ³)
Marée	Pas de contrainte	Marée de vives-eaux	Marée de mortes-eaux
Période volée	MARS 2022		MAI 2022

Tableau 1: Phases d'acquisition

La chronologie du vol de l'acquisition principale est illustrée dans la figure 3.

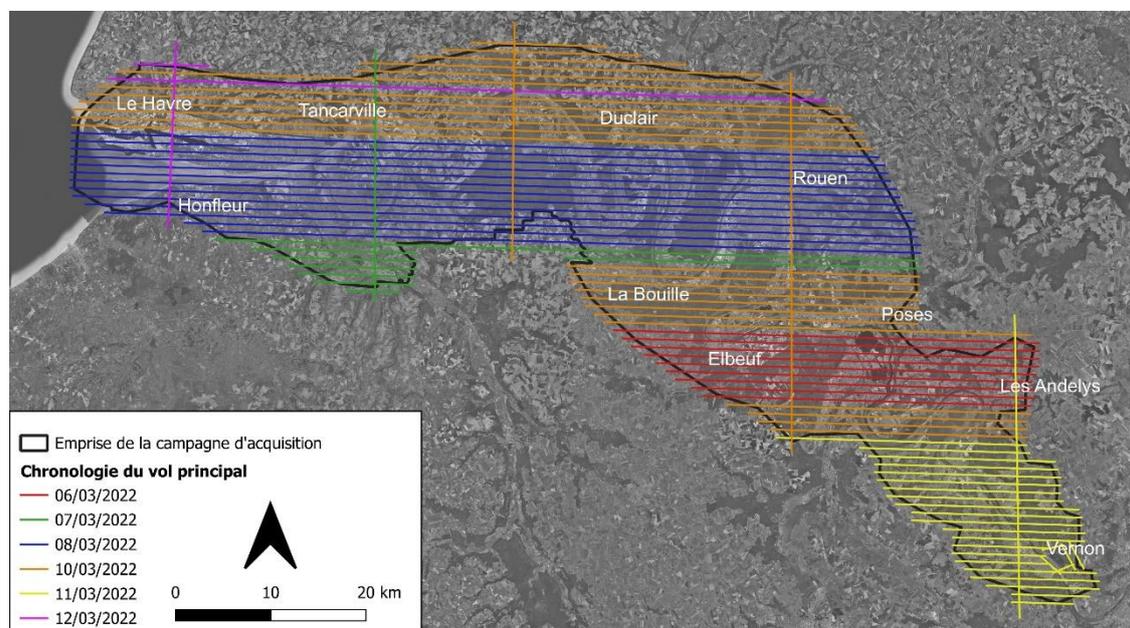


Figure 3 : Chronologie du vol principal (phase 1)

L'ensemble du territoire a été couvert avant le développement de la végétation, pendant la période dite « hors feuille ».

Des survols spécifiques sur les secteurs soumis à marnage ont été réalisés pendant les phases de basse mer afin de garantir l'acquisition de la topographie des zones intertidales. La chronologie de ces vols a été reportée dans la Figure 4.

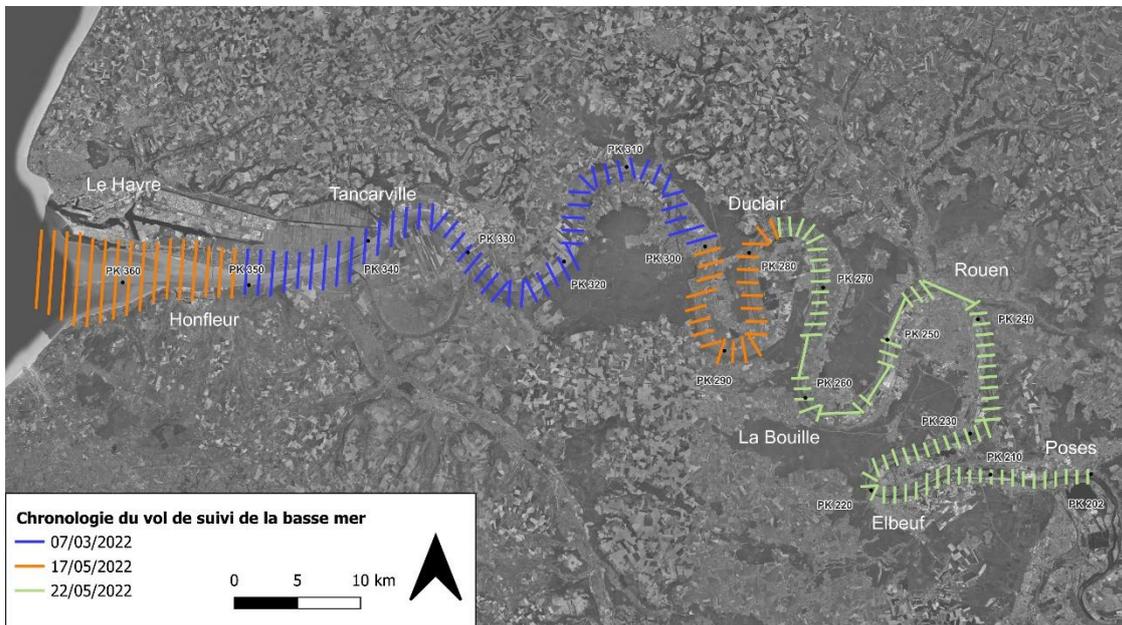


Figure 4 : Chronologie du vol marée basse (phase 2 et 3)

Il faut noter le cas particulier de la zone en aval du PK 356 qui a dû être volée une seconde fois en mai 2022 suite à une défaillance technique lors du vol de mars sur une partie de ce secteur. Cet aspect n'a pas eu de conséquence sur la qualité des données.

Les conditions hydrologiques rencontrées pendant les survols sont décrites dans la Figure 5.

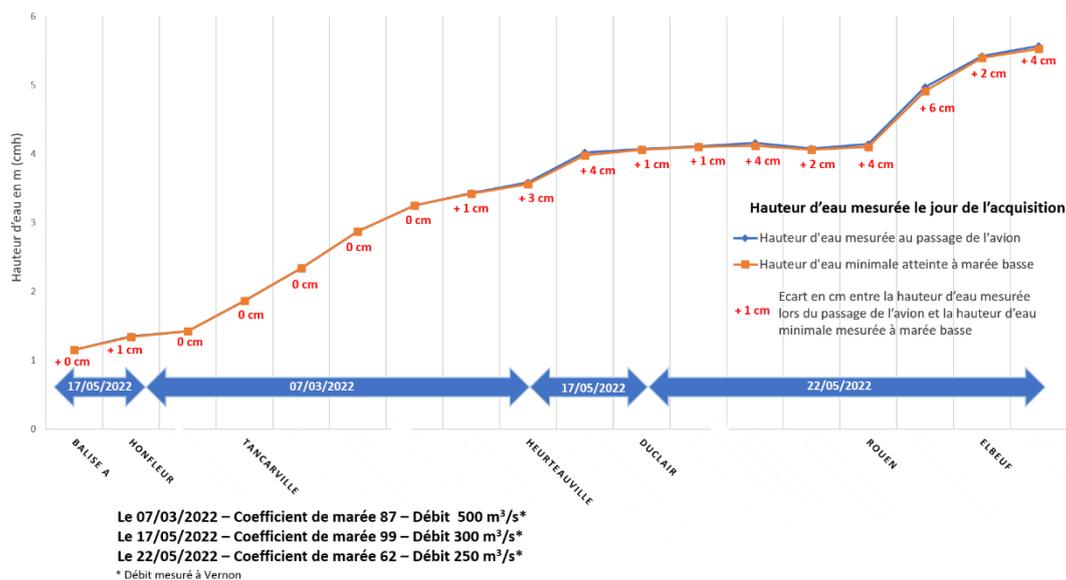


Figure 5 : Conditions hydrologiques lors des survols « marée basse »

Les survols ont été réalisés dans des conditions de basses eaux favorables pour la caractérisation de la topographie des zones intertidales.

2.2. Matériel

L'avion utilisé est un Piper PA-31-350 appartenant à la société PIXAIR Survey, partenaire de l'acquisition, basé à l'aéroport de Rouen – Vallée de Seine (Boos) et équipé d'une trappe accueillant le système LiDAR / Photo.



Figure 6 : Aéronef utilisé pour le projet LiDAR estuaire de Seine 2022 (source : PIXAIR)

Le projet a bénéficié d'un **scanner LiDAR RIEGL** disposant d'un **système de double-capteurs** (type RIEGL VQ-1560 II-S). Ce système permet d'émettre deux fois plus de signaux laser pour un même survol. Cette caractéristique est intéressante pour déterminer la topographie du sol dans le contexte d'une vallée fluviale concernée par des végétations parfois denses même en période hivernale (ex : roselière). Ce système a pu être mobilisé lors des vols de mars.

Concernant les vols de mai, un système classique constitué d'un unique capteur a été mobilisé (type RIEGL VQ-780II).

Concernant le volet orthophotographique, deux types de caméras différentes (RVB et infrarouge) ont été mobilisés en mars et en mai.

Les spécificités techniques détaillées du matériel d'acquisition sont décrites en Annexe 1.

2.3. Paramètres généraux d'acquisition des données LiDAR

Les principaux paramètres de l'acquisition selon les secteurs et phases sont décrits dans le Tableau 2.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Secteur	Ensemble de l'emprise	Zones riveraines PK 357 à PK 300	Zones riveraines PK 367 à PK 356 PK 299 à PK 202
Hauteur de vol	1050 m	1200 m	1000 m
Fauchée LiDAR brute au sol	1177 m	1345 m	1155 m
Recouvrement entre bande laser	30 %	24 %	26.5%
Distance interbande	824 m	1022 m	849 m
Densité de points LiDAR émise moyenne (hors recouvrement)	20.6 pts/m ²	26.4 pts/m ²	11.2 pts/m ²
Distance moyenne entre points (dans le sens du vol / perpendiculairement au sens du vol)	0.284 m / 0.379 m	0.220 m / 0.293 m	0.271 m / 0.299 m
Diamètre de l'empreinte laser au sol	0.186 m	0.212 m	0.186 m

Tableau 2 : principaux paramètres de l'acquisition

2.4. Cas particulier des zones d'interdiction de prises de vue aériennes

Depuis 2017, la position géographique et les contours des zones interdites de prise de vues aériennes (ou ZIPVA³) sont soumises à autorisation de survol pour permettre aux opérateurs aériens de travailler en toute légalité. Ce cadre permet d'éviter la diffusion et la publication d'images et de données sensibles sans contrôle.

ALTOA a été autorisé à survoler et acquérir les données sur ces ZIPVA, à l'exception de la ZIPVA 027-003 Vernon. Le plan de vol a dû être adapté sur ce secteur.

Les données acquises sur les ZIPVA survolées font l'objet d'un traitement particulier (voir § 3.7).

³ Au 1^{er} janvier 2023 le terme de ZIPVA est remplacée par ZICAD : Zones interdites à la captation aérienne de données

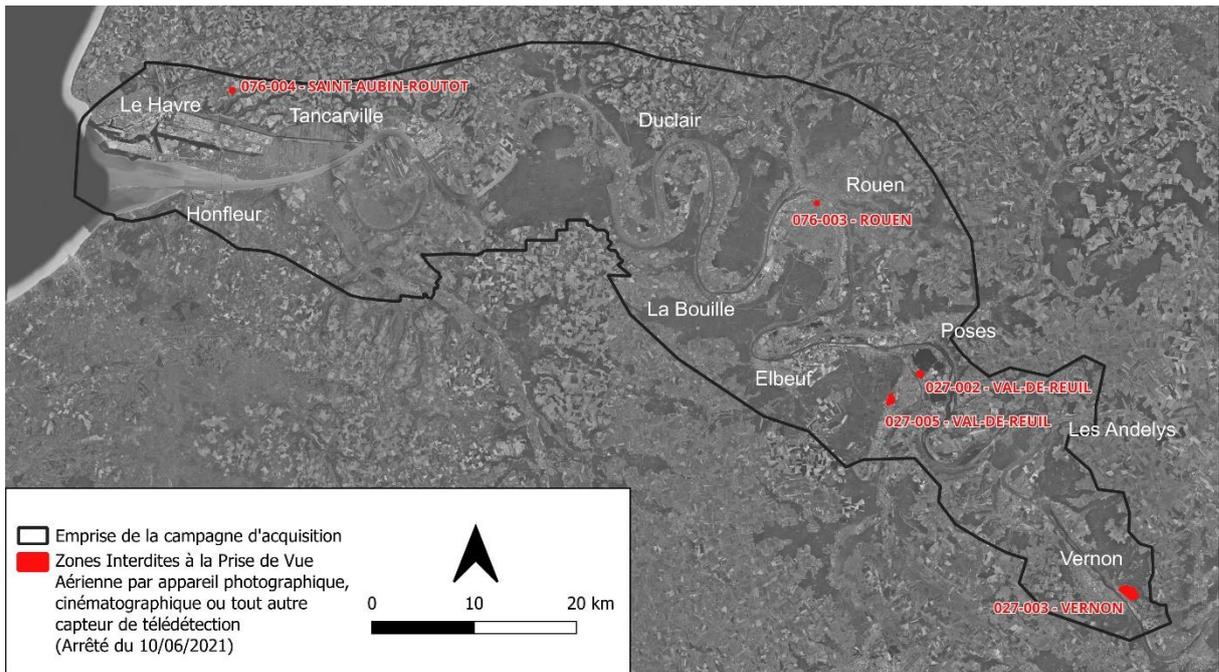


Figure 7 : Carte des zones interdites à la prise de vue aérienne par arrêté du 10/06/2021 (source : Data.gouv.fr)

3. TRAITEMENT DES DONNEES

3.1. Compilation des données LiDAR des différentes phases d'acquisition

Les données acquises au travers des différentes phases d'acquisition se superposent sur la zone du lit de la Seine. Plusieurs semaines séparent ces phases d'acquisition. L'objectif de la compilation des données était d'éviter des incohérences d'information liées à l'évolution du terrain pendant cette période. Pour cela, un seul jeu de données a été retenu dans les zones de superposition. Les données acquises en période « hors feuille » et pour les niveaux de seine les plus bas ont été privilégiées pour intégrer le jeu de données final.

Cette sélection permet la meilleure description possible du sol sous couverture végétale et sur les zones de balancement des marées.

La figure 8 présente les données sélectionnées pour les différents secteurs.



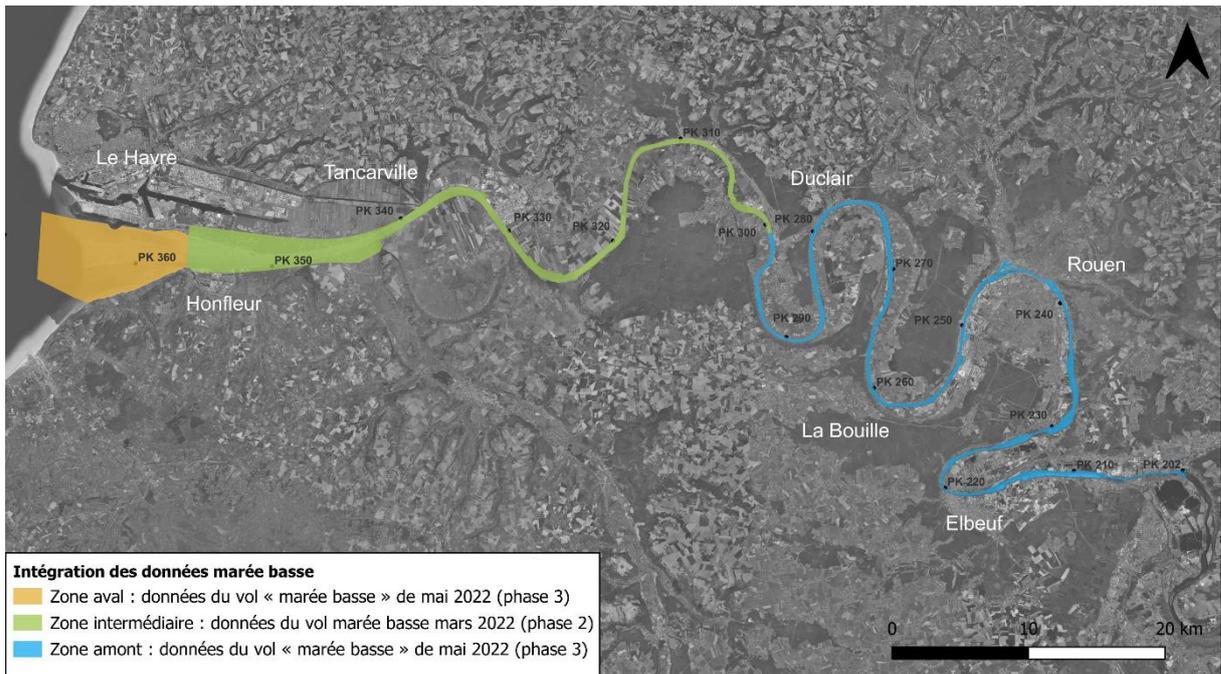


Figure 8 : Stratégie d'intégration des données LiDAR acquises à marée basse dans le semis de points principal

3.2. Traitement géométrique

Le traitement géométrique consiste à positionner les points LiDAR de manière cohérente entre eux (calage relatif) puis à les positionner par rapport au réseau de nivellement IGN en IGN69 (calage absolu).

3.2.1. Calage relatif

Le calage entre bandes de vol a été réalisé par jour de vol en prenant en compte les axes transversaux pour assurer la continuité du calage entre les différents jours d'acquisition.

Suite à ce calage, un rapport statistique par jour de vol est édité et analysé. C'est la valeur de l'erreur quadratique moyenne qui permet de valider le calage (l'EMQ doit être inférieur à 3 cm).

Date de vol	Nombre d'observations	EMQ Z (en cm)
06/03/2022	107647	2,2
07/03/2022	355983	2,0
08/03/2022	303091	2,1
10/03/2022	353127	2,0
11/03/2022	369454	2,0
12/03/2022	104799	2,1
17/05/2022 et 22/05/2022	51594	3,6

Tableau 3 : Résultat du calage relatif

La valeur guide des 3 cm est dépassée pour les vols du 17 et 22 mai. Cela s'explique par la nature du terrain couvert en majorité par des zones en eau.

3.2.2. Calage absolu

L'opération de calage absolu est réalisée en s'appuyant sur des surfaces de calage nivelées acquises spécifiquement pour le projet. Pour atteindre les objectifs de précision, une correction est appliquée sur base de relevés terrain par méthode GPS RTK (réseau ORPHEON) de précision centimétrique.

Le calage a été réalisé à partir de 8 surfaces réparties sur l'ensemble du territoire. La vérification de la qualité du calage et le calcul du niveau de précision ont été réalisés à partir de 12 autres surfaces.

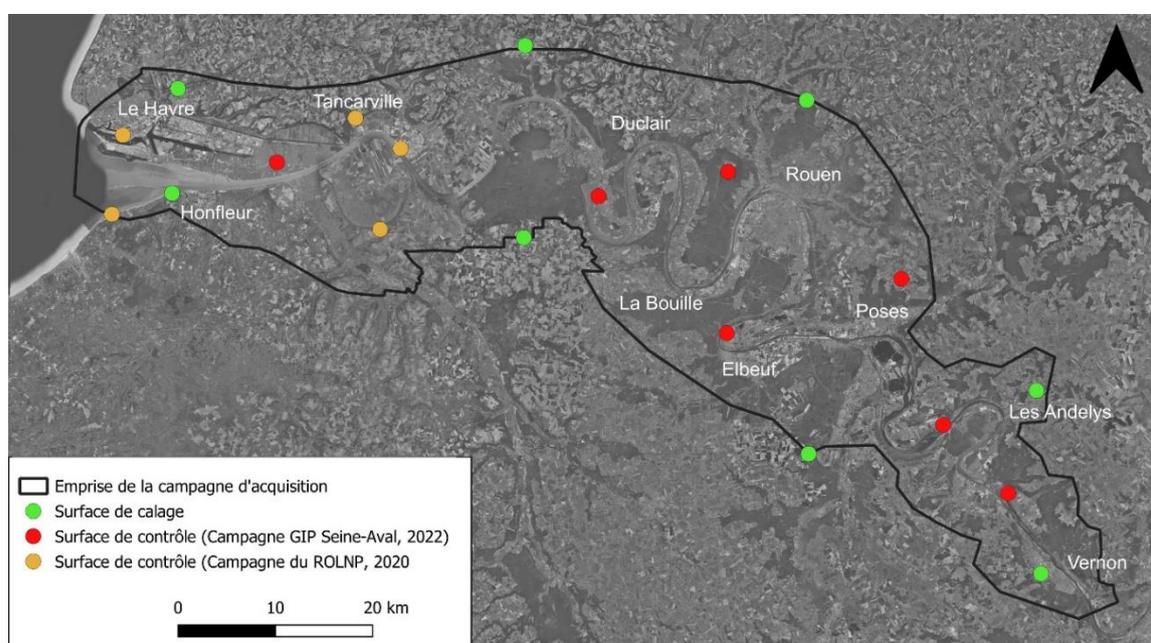


Figure 9 : Carte des surfaces de calage et de contrôle acquise par le prestataire

Le niveau de précision altimétrique atteint à l'issue de l'opération de calage absolu est synthétisé dans le Tableau 4.

	Z (EN CM)
Ecart min	-6,3 cm
Ecart max	+6,9 cm
Moyenne des écarts	+1 cm
EMQ Z	+3,3 cm
Ecart-type	+3,2 cm

Tableau 4 : niveau de précision altimétrique atteint à l'issue de l'opération de calage absolu.

3.3. Classification du semis de points

La classification comprend une phase de traitement automatique et une phase de traitement manuelle. La phase de classification manuelle, qui nécessite l'analyse de l'ensemble de la couverture LiDAR constitue le volet le plus chronophage de la prestation. L'ensemble des classes identifiées sont décrites ci-dessous.

3.3.1. Classes standard : sol, bâti, végétation et eau

La classe « sol » correspond à l'ensemble des points LiDAR caractérisant la surface du terrain naturel, parfois recouvert d'un revêtement.

La classe « bâti » correspond à l'ensemble des points LiDAR caractérisant un bâtiment.

Les 3 classes « végétation » correspondent à l'ensemble des points LiDAR caractérisant les végétations selon 3 gammes de hauteur (Figure 10) :

- ⇒ Végétation basse (< 1m)
- ⇒ Végétation moyenne (entre 1 et 5 m)
- ⇒ Végétation haute (> 5 m)

Selon les caractéristiques des plans d'eau, le laser peut renvoyer un écho. La classe « eau » rassemble tous ces points.



Figure 10 : Classification : sol, bâti, végétation, eau



3.3.2. Classes particulières

3.3.2.1. Traitement spécifique des zones de recouvrement

Les zones de recouvrement sont les zones de superposition des bandes de vol, caractérisées par une densité de points LiDAR deux fois plus importante. L'incertitude associée à la technique LiDAR montre que, même après l'étape de calage relatif des données (cf. 3.2.1), il reste un décalage d'altitude entre les bandes de vol qui peut atteindre l'ordre de grandeur de la précision altimétrique attendue dans le cadre du projet. En d'autres termes, une bande de vol peut se situer au-dessus de l'autre avec un écart pouvant dépasser les 5 cm.

Ce décalage peut engendrer des erreurs lors de la classification automatique des données étant donné qu'il est difficile de distinguer des micro-reliefs, de la présence de végétation basse. Ainsi, un artefact observé dans certains secteurs, concerne les points de la bande de vol située au-dessus qui étaient classés « végétation basse » alors qu'ils représentent bien le sol.

Afin de limiter ce type d'artefact, un classement particulier a été opéré dans ces zones de recouvrement. Ainsi une des deux bandes a été classée dans la classe prévue à cet effet : la classe « Overlap : Points en recouvrement ». Les points ne sont pas supprimés du jeu de données. La densité d'information restante pour caractériser le sol et les autres classes est tout à fait conforme aux attentes, étant donné l'importante densité de points acquise.

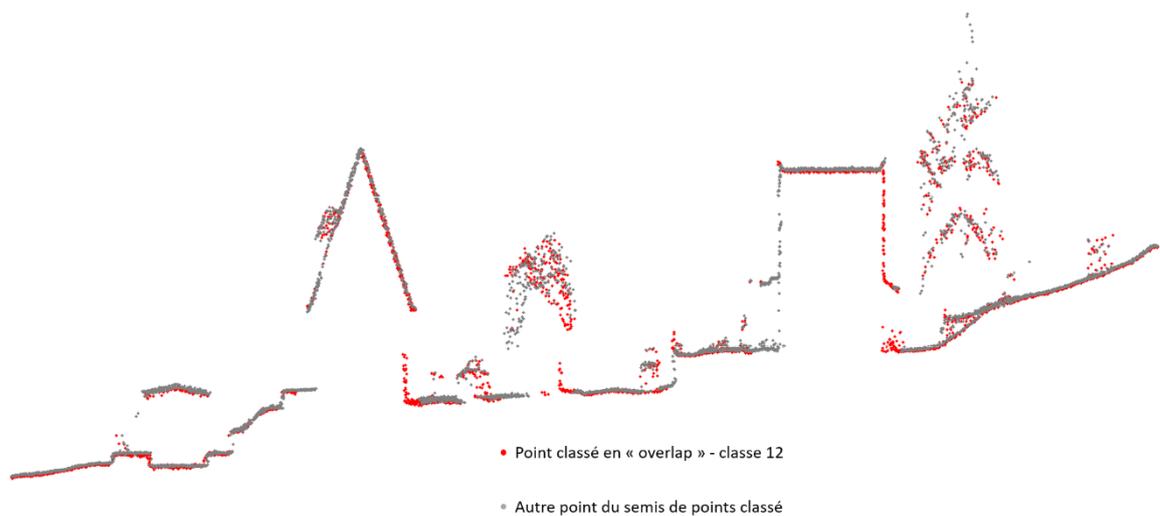


Figure 11 : Classification "overlap"

3.3.2.2. Murets

L'importante densité de points acquise grâce au matériel mobilisé a permis de traiter de manière spécifique les éléments de sursol de faible épaisseur et d'intérêt pour les thématiques d'étude du GIP Seine-Aval.

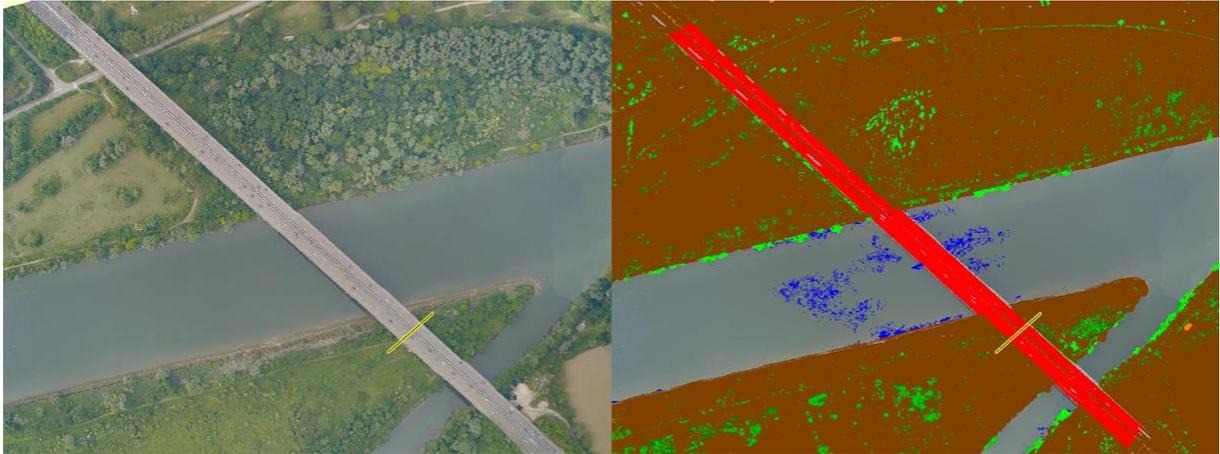
Ainsi, la classe « Murets » contient l'ensemble des points LiDAR répondant à la définition suivante : les éléments de la classe « mur » (13) sont définis comme des ouvrages linéaires délimitant les voies de circulation importantes (muret routier et autoroutier) et présents au bord des cours d'eau (muret anti-inondation). Ils présentent une largeur inférieure à 50 cm et une hauteur inférieure à 1.50 m.



Figure 12 : Classification "muret"

3.3.2.3. Tabliers de pont

Les tabliers de pont, correspondant aux parties des ouvrages d'art non directement posés sur le sol, ont été identifiés pour éviter une confusion avec le sol.



- Point « tablier de pont » - classe 17
- Point « sol » - classe 2
- Point « bâti » - classe 6
- Point « végétation haute » - classe 5
- Point « non classé » - classe 1

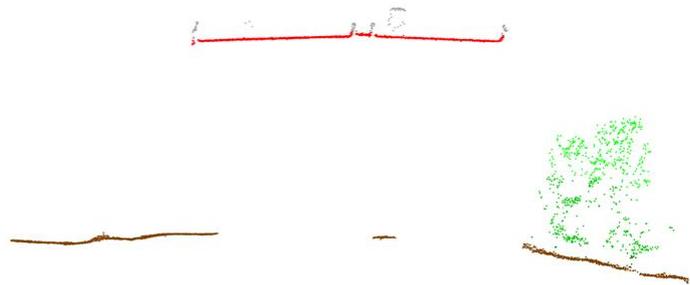


Figure 13 : Classification "tablier de pont"

3.3.2.4. Ecluses

Cette classe regroupe les points LiDAR caractérisant les écluses.

Cette classe a été ajoutée pour pallier à des incohérences dans le traitement de la classe sol pour ces ouvrages complexes.

3.3.2.5. Éléments non pérennes

Cette classe regroupe l'ensemble des points LiDAR répondant à la définition suivante : les points représentant des entités installées de manière temporaire pouvant modifier le sol et le sursol (ex : dépôt de matériaux, conteneur, marché éphémère ou cirque).





Figure 14 : Classification "éléments non pérennes"

3.3.3. Autres classes

Les autres points LiDAR sont classés dans les classes suivantes :

- ⇒ « Non classé » : cette classe contient les éléments du sursol non classifiés comme les véhicules, les bateaux, le mobilier urbain, les piétons, les câbles électriques, les grues, certaines clôtures, les pylônes.
- ⇒ « Artefacts, Points bas, Points Hauts » : cette classe contient des points aberrants :
 - plus bas que la surface du sol,
 - entre le sursol et le capteur.



Figure 15 : Exemple illustrant la classification de points aberrants : présence d'un avion.

3.4. Traitement des zones en eau

Étant donné la caractéristique aquatique du secteur d'étude, une attention particulière a été portée sur les zones en eau. Une délimitation non automatique de l'ensemble des zones en eau d'une surface supérieure à 100 m² a été opérée. Ce traitement a permis de délimiter ces zones lors de la génération de la grille MNT.

3.5. Grilles MNT-MNE

De nombreux utilisateurs utilisent les grilles simplifiées pour répondre à leurs objectifs d'analyse : des MNT (sol) et des MNE (sol et sursol).

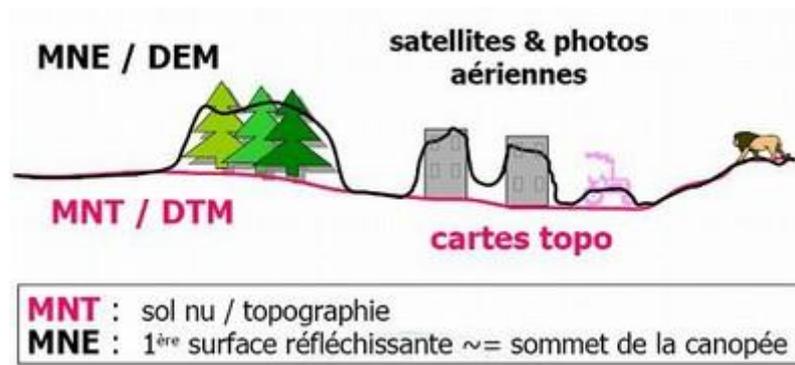


Figure 16 : Différence entre les MNT et MNE (Source : [Les MNE gratuits](#) (Marc Bernard, Forum Photogrammétrie, 2009))

La constitution de telles grilles implique principalement de définir :

- ⇒ les classes de points à retenir (ex : uniquement le sol pour un modèle numérique de terrain) ;
- ⇒ La résolution de la grille (taille de cellule) ;
- ⇒ La méthode de traitement de l'information altimétrique (valeur du Z) pour renseigner une valeur unique (ex. moyenne, min, max etc) dans chaque cellule de la grille.

Deux grilles ont été produites :

➤ Un Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Cette grille représente le terrain nu et exclut toute zone bâtie, sous les tabliers de pont, ou en eau.

- Classe de points utilisée : sol
- Résolution 1m
- Z = moyenne des points LiDAR

Le MNT est construit à une résolution de 1 m avec un rayon de recherche maximisant, permettant de couvrir l'ensemble des zones sans données.

Cette méthode génère des données incohérentes dans les zones bâties, sous les tabliers de pont et dans les zones en eau. Dans ces zones, les données MNT ont été supprimées. Ce traitement a impliqué au préalable une numérisation des zones en eau (voir 3.4) et une vectorisation automatique des zones bâties (supérieur à 25 m²) et des zones de tablier de pont.

➤ Un Modèle Numérique d'Élévation (MNE)

Cette grille représente le modèle numérique d'élévation, l'objectif est de représenter le sol et le sursol.

- Classes de points utilisées : sol, bâtiments, végétation, murets, ouvrages d'art, écluses.
- Résolution 1m
- Z = valeur maximale des points LiDAR (point le plus haut)

La méthode utilisée est de prendre le point le plus haut par pixel de 1 m en intégrant les points classés sol, bâtiments, végétation, murets, écluses, les tabliers de pont.

Concernant les zones en eau, une méthode particulière a été utilisée afin d'obtenir un plan homogène tenant compte des variations de niveaux d'eau. Elle consiste à interpoler les cotes topographiques du terrain (sol) aux limites des zones en eau.

3.6. Ortho-photos dites « techniques »

En complément des données LiDAR, des orthophotographies couleur et infra-rouge synchrones au levé LiDAR ont été acquises. Ces orthophotographies sont dites « techniques ». Elles ont pour objectif d'aider l'utilisateur à interpréter les données LiDAR.

Ainsi, au regard des objectifs du projet, elles n'ont pas fait l'objet d'une stratégie d'acquisition adaptée pour une ortho-photo haute qualité. Les traitements visant à harmoniser et améliorer le rendu final sont également limités. Par exemple, les bâtiments n'ont pas fait l'objet d'un redressement.

Les principaux traitements réalisés ont permis :

- D'harmoniser les couleurs, la lumière sur l'ensemble du territoire d'acquisition et à améliorer le rendu des photos acquises tôt le matin lors de l'acquisition marée basse.
- De corriger la géométrie des 4 principaux ponts. Lorsque des déformations persistent, elles ont été décalées vers le milieu du lit de la Seine afin de limiter la déformation sur la partie terrestre.





Figure 17 : Exemple de correction au niveau d'un ouvrage d'art

Les orthophotographies mises à disposition sont :

- Les orthophotographies RVB et Proche infrarouge de l'ensemble de l'emprise acquises en mars 2022 à une résolution de 10 cm
- Les orthophotographies RVB et Proche infrarouge acquises à marée basse en mars et mai 2022 à une résolution de 10 cm

3.7. Cas particulier des zones d'interdiction de prises de vue aériennes

En termes de traitements, les données livrables en secteur ZIPVA présentent les caractéristiques suivantes :

- LiDAR :
 - o Nuages de points : points supprimés
 - o Grille : trou dans les grilles
- Imagerie :
 - o Images brutes : pixels dégradés à une résolution de 10 m
 - o Orthophoto : résolution dégradée à 10 m
- Imagerie ZIPVA 023-003 Vernon :
 - o Images brutes : pas d'information (no data)
 - o Orthophoto : pas d'information (no data)



4. CONTROLE QUALITE REALISE GIP SEINE-AVAL

Le contrôle qualité réalisé tout au long de la prestation a consisté à vérifier la conformité et la qualité des différents produits : le semis de points, les grilles MNT et MNE et les orthophotographies.

4.1. Le Semis de points

La cohérence générale de la donnée, la précision altimétrique et la conformité de la classification ont été contrôlées.

4.1.1. Cohérence des données

Un contrôle visuel en plusieurs dimensions a été réalisé dans le but de contrôler 3 principaux points :

- **La bonne intégration du semis de points acquis à marée basse.**

L'exemple illustré dans la Figure 18 montre un résidu du niveau d'eau du plan de vol principal classé automatiquement en végétation basse. Ces points ont ainsi pu être retirés du semis de points.

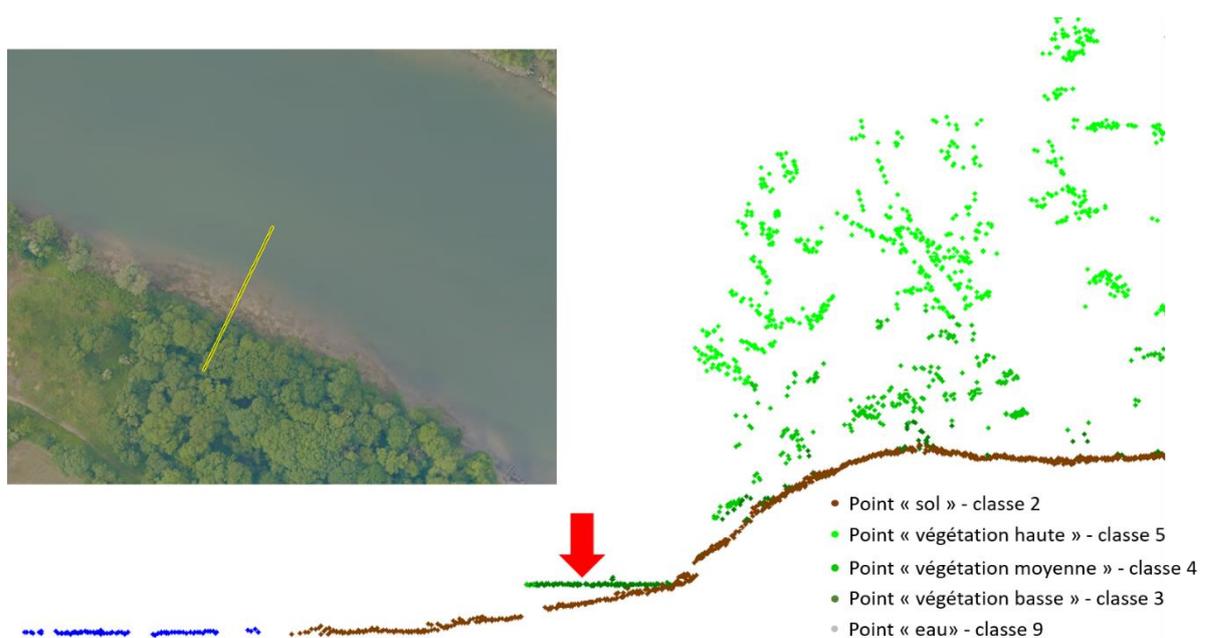


Figure 18 : Résidu de la ligne d'eau du plan de vol principal

- **l'absence de trou d'acquisition dans le semis de points** en dehors des zones interdites de survol et des grandes zones en eau.

- **la bonne cohérence entre les bandes de vol**

L'objectif ici est d'identifier les écarts aberrants d'altimétrie entre les bandes de vol. Un écart maximal de 10 cm entre bandes a été retenu en cohérence avec la classe de précision des

données attendue. Le cas illustré ci-dessous montre un écart de 15 cm entre les bandes de vol 102 et 103 suite à un problème de trajectographie. Après correction par le prestataire, l'écart est réduit.

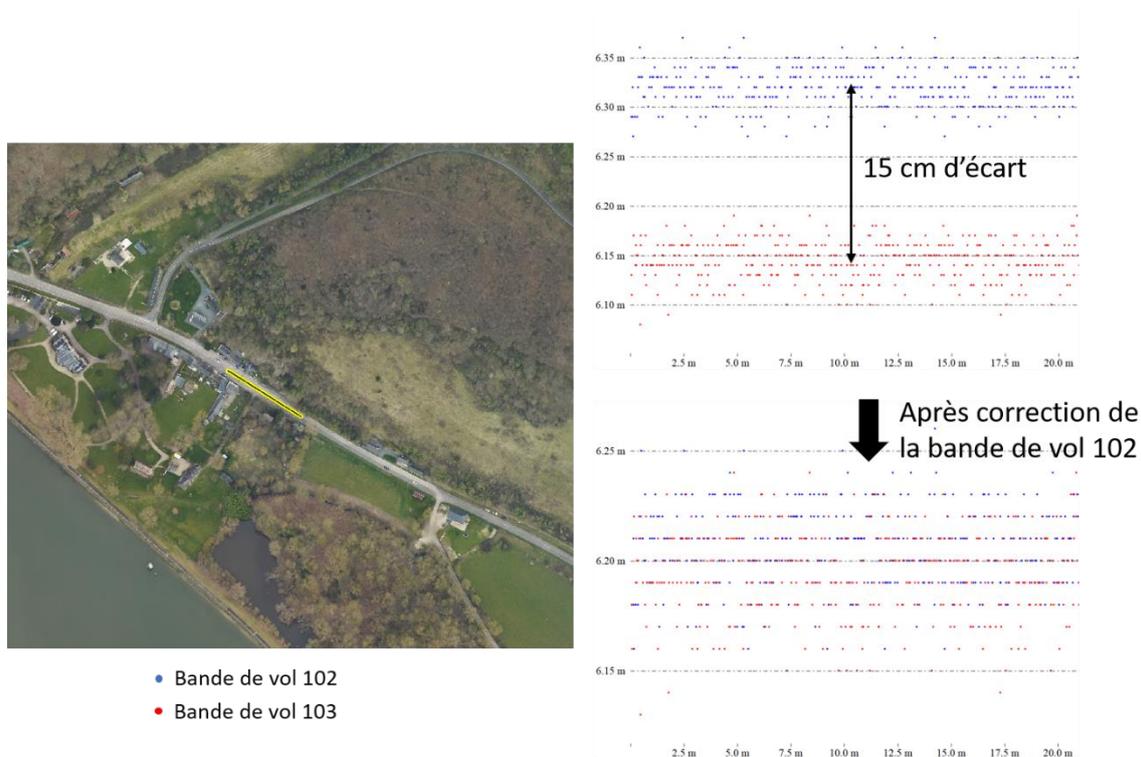


Figure 19 : Contrôle de l'écart entre les bandes de vol

4.1.2. Précision altimétrique

L'objectif est de contrôler les écarts entre l'altimétrie du semis de points et l'altimétrie d'une série de points de contrôle acquis sur le terrain par un géomètre.

Les points de contrôle ont été acquis sur des zones planes, dures et découvertes. La précision doit être au minimum 2 fois celle demandée pour le produit (5 cm dans notre cas) donc de 2,5 cm en altimétrie.

Pour réaliser le contrôle, deux jeux de données de contrôle acquis en 2022, répartis sur l'ensemble du territoire d'étude et présentant des caractéristiques d'acquisition et de précisions similaires ont pu être mobilisés :

- Les points de stéréopréparation, destinés au traitement de l'orthophoto acquis pendant l'été 2022 dans le cadre de la campagne orthophotographique/LiDAR du groupement Le Havre Métropole, EDF, Haropa port
- Les points acquis spécifiquement pour le projet LiDAR du GIP Seine-Aval par l'unité topographique de la Métropole Rouen Normandie en novembre 2022. L'effort de contrôle a porté sur les zones à proximité de la Seine.

La Figure 20 montre la répartition géographique des 141 points de contrôle.

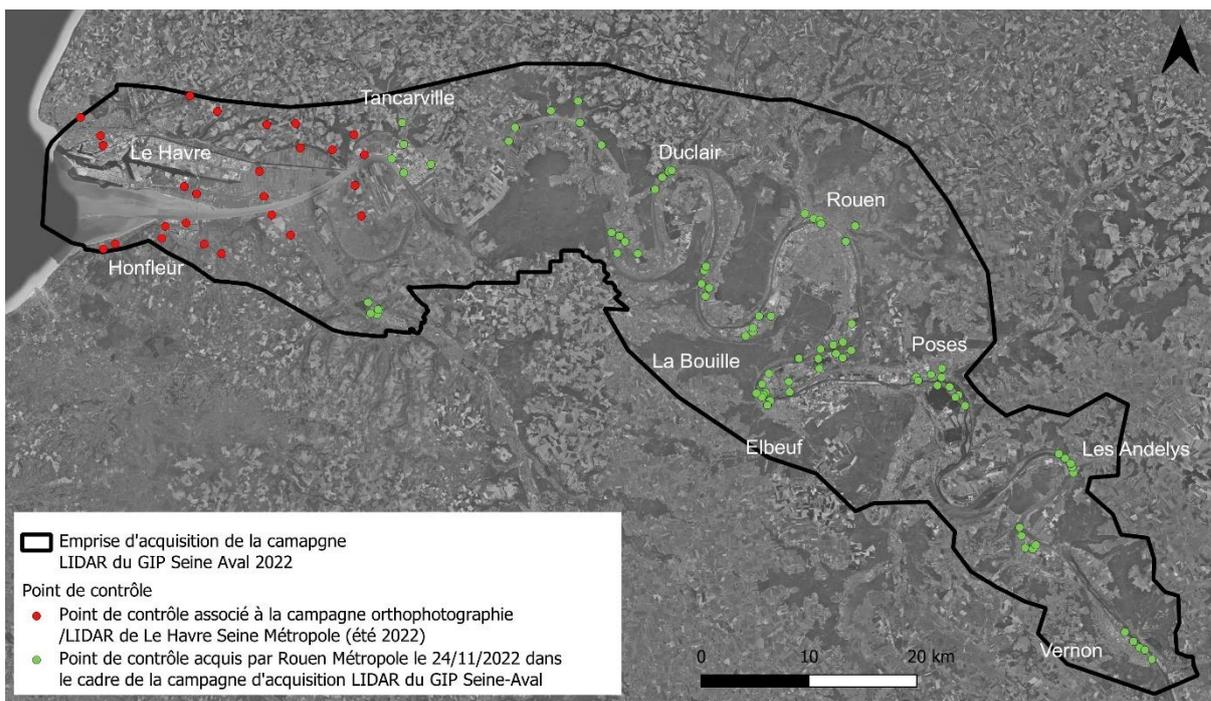


Figure 20 : Carte des points de contrôle

La méthode consiste à **comparer l'altitude des points de contrôle par rapport à la moyenne des altitudes des points LiDAR classés en sol à proximité immédiate du point de contrôle** (dans un cercle de rayon de 50 cm). Cette proximité permet de minimiser le risque d'intégrer des éléments présentant une différence altimétrique trop marquée, tels qu'une bordure ou un aménagement urbain.

Le niveau de précision des données LiDAR en altimétrie calculé par cette méthode est synthétisé dans le Tableau 5.

VALEURS STATS	Z (EN CM)
Ecart min	-8,0 cm
Ecart max	+12,8 cm
Moyenne des écarts	+2,4 cm
EMQ Z	4,6 cm
Ecart-type	3,9 cm

Tableau 5: précision de l'altitude des données LiDAR calculée lors du contrôle qualité

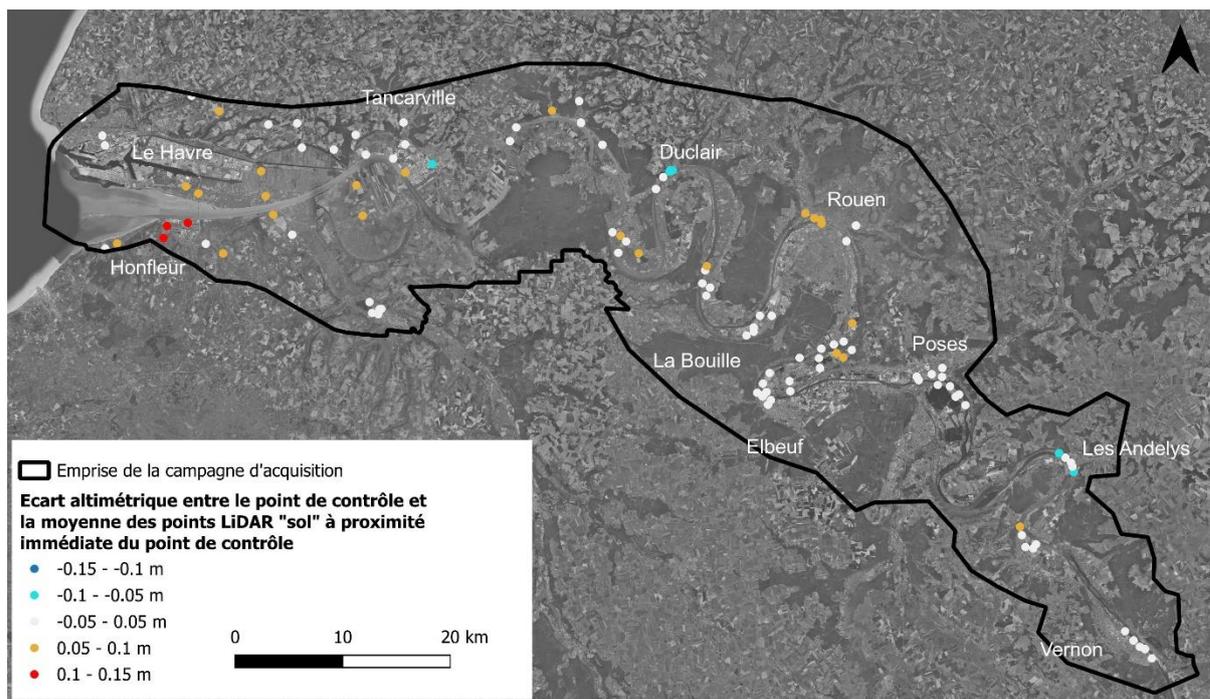


Figure 21 : Carte des écarts altimétriques en points de contrôle et points LiDAR

Le résultat montre une erreur quadratique moyenne (indicateur usuel pour ce type de contrôle) de 4,6 cm. Il a permis de valider l'atteinte de la classe de précision spécifiée dans le cahier des charges (5 cm).

La Figure 21 montre que localement des écarts supérieurs à 10 cm sont observés.

En complément de cette analyse, l'unité topographique de la Métropole de Rouen Normandie a réalisé son propre contrôle. Ils se sont appuyés sur le même échantillon de points de contrôle. La méthode utilisée se réfère à l'arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte. Ce contrôle indique une classe de précision de 5 cm, cohérente avec notre contrôle qualité.

4.1.3. Classification

L'objectif est de contrôler que les éléments (sol, bâti, végétation, etc.) sont correctement classés en s'appuyant sur les photos aériennes récentes disponibles :

- L'orthophotographie du ROLNP de 2020
- La BD Ortho de l'IGN de 2019
- Les photos aériennes brutes (non géoréférencées et non ortho-rectifiées) acquises durant la campagne d'acquisition LiDAR. En effet la procédure d'ortho-rectification est réalisée après la fin de classification afin de mobiliser les données classées sol et le MNT.

Au total 267 dalles de 1 km² sur les 2555 (environ 10%) ont fait l'objet d'un contrôle complet. Plus spécifiquement, l'ensemble des rives de l'estuaire ont également fait



l'objet d'un contrôle. La répartition géographique des dalles contrôlées est illustrée en Figure 22.

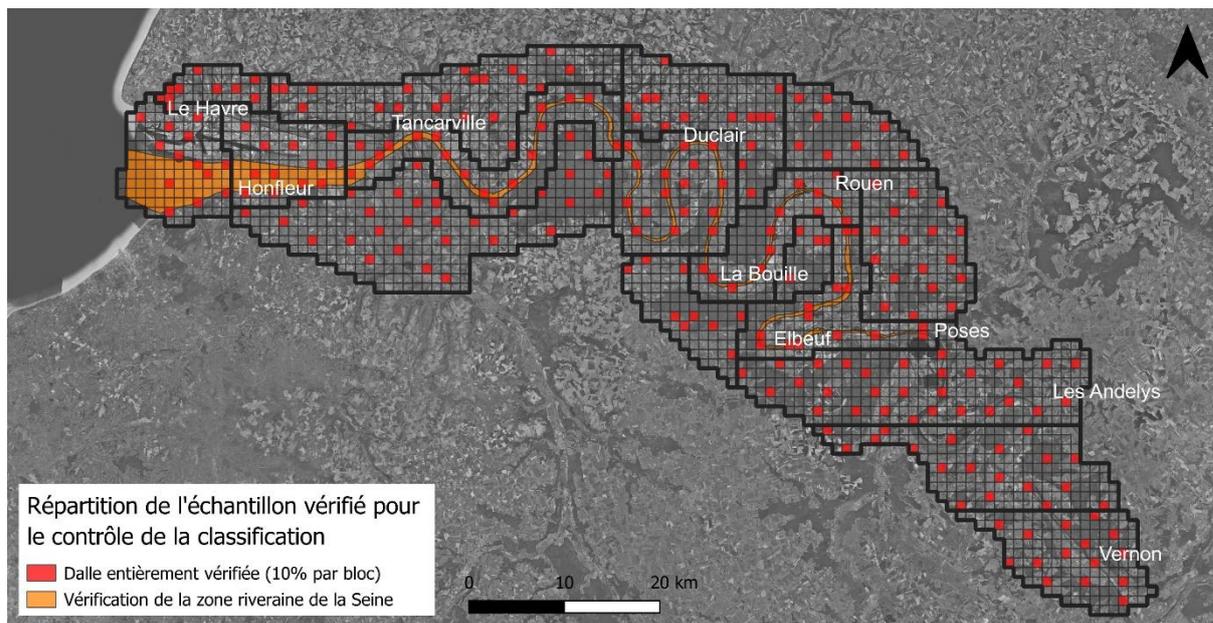


Figure 22 : Carte de répartition des échantillons de données contrôlés

Le contrôle qualité a engendré de nombreuses reprises de données par le prestataire.

A l'issue de ce travail, des points de vigilance sont portés à connaissance de l'utilisateur :

- Les zones d'enrochement pouvant constituer un sursol sont considérées comme du sol.
- Des bâtiments positionnés en contrebas d'un relief ou d'un autre bâtiment peuvent être confondus avec le sol.
- En milieu urbain, les murs de séparation, le petit bâti (cabane de jardin, véranda...) peuvent être confondus avec de la végétation (voir Figure 23).
- La végétation très basse peut ne pas avoir été détectée et être confondue avec le sol.
- La végétation aquatique peut être confondue avec le sol ou l'eau.

La limite entre le tablier d'un pont et les voies d'accès sur remblais sont parfois difficiles à caractériser



Le traitement des données en zone urbaine est complexe et est en grande partie un travail de classification manuelle.

La figure illustre cette complexité et montre les erreurs d'interprétation qui peuvent être rencontrées dans les zones urbaines :

- *Difficulté de faire la différence entre les murs urbains et les haies*
- *Difficulté de différencier les éléments bâti léger (cabane de jardin, véranda,...) d'un élément de végétation*

Figure 23 : Confusion de classification en zone urbaine



4.2. Grilles MNT et MNE

Les grilles MNT et MNE sont des produits directement issus du traitement du semis de points classés. Le contrôle qualité a permis de vérifier :

- La cohérence entre les dalles : chaque dalle doit être cohérente avec ses voisines, sans déformation en limite de dalle ni de différence altimétrique avec les dalles voisines.
- L'absence de trous de données entre les dalles pour avoir une information continue.

4.3. Orthophotographie

Le contrôle réalisé sur les orthophotographies vise à vérifier la qualité des photos aériennes sur les points suivants :

- **La cohérence générale des photos entre elles (couleur, mosaïquage)**

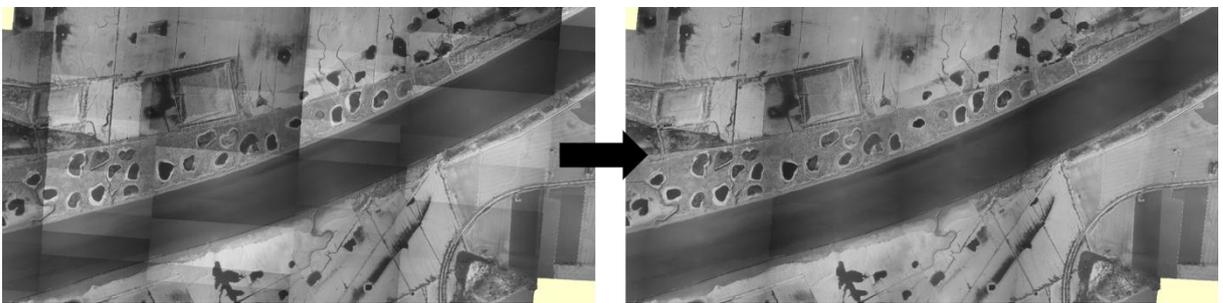


Figure 24 : Exemple d'amélioration du mosaïquage

- **La qualité de la photo :**

Cette étape permet d'identifier les zones présentant un rendu de qualité moindre en termes de couleur, lumière ou netteté.

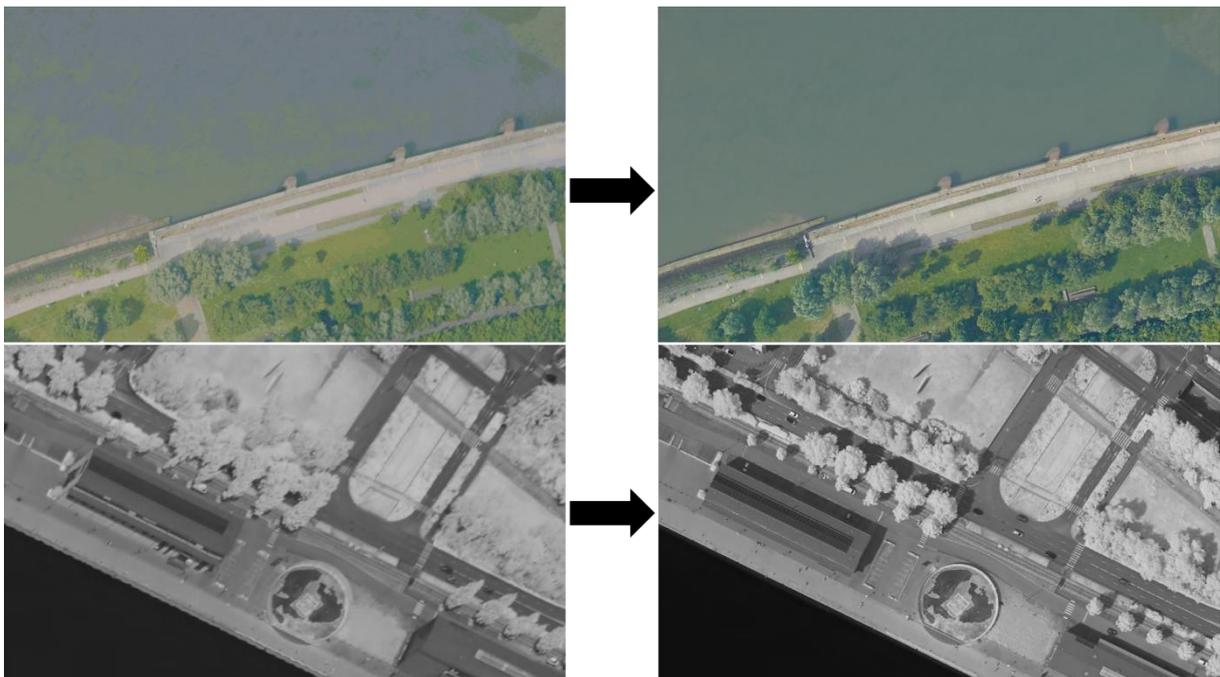


Figure 25 : Exemple de photos qui ont nécessité une correction

5. LES DONNEES DISPONIBLES

Les produits disponibles sont présentés dans le Tableau 6 et détaillés dans des fiches descriptives.

Produits	Fiches descriptives
Semis de points classés	Télécharger fiche
MNT 1 m (moyenne)	Télécharger fiche
MNE 1 m (point le plus haut)	Télécharger fiche
Orthophotographie emprise complète RVB	Télécharger fiche
Orthophotographie emprise complète P-IR	Télécharger fiche
Orthophotographie Marée basse RVB	Télécharger fiche
Orthophotographie Marée basse P-IR	Télécharger fiche

Tableau 6 : Liste des livrables disponibles

6. MODALITES D'ACCES ET DROIT D'UTILISATION DES DONNEES

Les produits sont disponibles sur simple demande effectuée via le formulaire : <https://forms.gle/jdMFJBza2iC5EzpL9>

Afin de préciser le périmètre géographique du besoin. La demande doit être accompagnée de l'emprise géographique au format SIG, transmise par mail.

Les données sont mises à disposition sous licence ETALAB V 2.0. (<https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-open-licence/>).

Toute utilisation des données devra porter la mention « Source des données : GIP Seine-Aval 2023 ».



7. BILAN DU PROJET

Les données LiDAR et photographiques ont été acquises entre mars et mai 2022. La phase de traitement et de contrôle des données s'est déroulée jusqu'à la fin du premier semestre 2023.

A l'issue du projet, les principales caractéristiques des données disponibles sont :

- **Des données acquises en dehors des périodes de développement de la végétation (hors feuille) et de faibles niveaux d'eau en Seine**

Ces conditions d'acquisition permettent de répondre spécifiquement aux objectifs d'utilisation du GIP Seine-Aval. Elles permettent également de disposer de données tout à fait complémentaires des autres projets d'acquisition de données LiDAR ou Orthophoto sur le territoire qui ciblent en général la période estivale.

- **Une densité de points LiDAR supérieure à 20 pts/m²**

L'importante densité de points offre notamment des perspectives intéressantes pour analyser la morphologie du terrain. En complément de grilles MNT et MNE mises à disposition par défaut, l'utilisateur pourra mobiliser le semis de points classés pour adapter les méthodes de



calcul de ces grilles à ses objectifs d'utilisation des données. Une illustration des différences obtenues pour le calcul du MNT selon différentes méthodes est proposée en annexe 2.

- **Une classe de précision en Z de l'ordre 5 cm**

La précision géométrique des points atteinte dans le projet se situe à l'état de l'art. Localement, les écarts peuvent être plus importants que la classe de précision fournie par le contrôle qualité, même dans des zones dégagées et planes. L'incertitude n'est pas évaluée dans les zones semi-naturelles.

- **Une classification des données LiDAR détaillée**

Une classification détaillée est un outil précieux pour répondre spécifiquement à différents objectifs d'analyse. Étant donné l'importance de la surface couverte et la complexité du territoire, des erreurs ponctuelles sont présentes dans les données finales et des points d'attention ont été listés.

- **Deux ortho-photo synchrones de résolution 10 cm, couvrant d'une part l'ensemble du territoire en hiver et d'autre part le lit de la Seine à marée basse**

Ces orthophotos dites « techniques » constituent un outil essentiel pour utiliser de manière optimale les données LiDAR. Si leur qualité graphique reste de qualité moindre que dans le cadre des projets dédiés à la réalisation de ce type de produit, leur acquisition en période hivernale et à marée basse en fait des outils complémentaires des ortho-photos acquises par les partenaires du territoire.

Les données seront mobilisées pour répondre à de nombreux domaines d'étude : risque inondation, gestion des milieux aquatiques, des forêts et autres milieux naturels ou semi-naturels, urbanisme ou encore archéologie.

Parmi les utilisations, l'analyse des évolutions de la morphologie du terrain par comparaison de différents jeux de données LiDAR constitue une attente forte. Les incertitudes liées à la technique LiDAR, au traitement des données, ainsi qu'à la nature du terrain étudié, influencent la précision à laquelle l'analyse des évolutions peut être réalisée. Ainsi, ce type d'analyse devra reposer sur la mise en œuvre d'une méthodologie adaptée au contexte et aux objectifs de l'étude. L'annexe 3 illustre quelques questionnements que posent la comparaison des données LiDAR du GIP Seine-Aval (comparaison des données 2010/2011 et des données 2022).

Des communications régulières, permettant de valoriser les diverses utilisations des données seront proposées.

ANNEXE 1 : CARACTERISTIQUES DETAILLEES DES SCANNERS LIDAR ET CAMERAS MOBILISES

PARAMETRES	SCANNER LASER	
Phase d'acquisition	Phase 1 et 2 - Mars 2022	Phase 3 - Mai 2022
Type et marque	LiDAR VQ-1560II	LiDAR VQ-780II
Longueur d'onde du laser	Proche infrarouge	Proche infrarouge
Moyen de balayage	Miroir rotatif	Miroir rotatif
Fréquence de balayage	Paramétrable de 40 à 600 scan/s	Paramétrable de 30 à 300 scan/s
Angle de balayage	Paramétrable jusqu'à 58°	Paramétrable jusqu'à 60°
Fréquence d'impulsion	Paramétrable jusqu'à 4 MHz	Paramétrable jusqu'à 2 MHz
EMQ Z	20 mm	20 mm
Angle de divergence	< 0.25 mrad	< 0.25 mrad
Portée	300 à 6800 m	100 à 5600 m
Nombre d'échos mesurés	Illimités (Retour Complet de l'onde)	Illimités (Retour Complet de l'onde)
Intensité mesurée	8 bits (0 à 255)	8 bits (0 à 255)
PARAMETRES	CAMERAS	
Phase d'acquisition	Phase 1 et 2 - Mars 2022	Phase 3 - Mai 2022
Type et marque	IXU RS1000 Phase One	IXU 180R/160 Phase One
Domaine spectral	RVB / IR	RVB / IR
Type de capteur	100 Mega pixels	80 Mega pixels
Taille du photosite	53.4 x 40.0 mm 11608 * 8708 pixels	53.7 x 40.4 mm 10328 * 7760 pixels
Dimensions du capteur	4.6 microns	5.2 microns
Distance focale	50 mm	50 mm
Compensation de filé	TDI (Time Delay Integration)	TDI (Time Delay Integration)
Profondeur radiométrique	16 bits / canal	16 bits / canal

ANNEXE 2 : IMPORTANCE DU CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL DU MNT

Le MNT mis à disposition par défaut est de résolution 1 m. Selon les objectifs, des résolutions plus grandes (>1 m) peuvent être plus pertinentes. Des résolutions plus faibles sont possibles. A titre d'exemple, l'IGN dans le cadre du projet LiDAR HD proposera un MNT à 50 cm. Considérant que le diamètre au sol du point laser est de l'ordre de 18 cm, il ne semble pas pertinent de descendre à des résolutions plus petites que 50 cm.

La question s'est posée du choix de la méthode de calcul de la valeur pour chaque pixel de 1 m. Parmi les nombreuses méthodes disponibles, les plus couramment utilisées sont :

- La triangulation : le MNT est créé par le maillage triangulaire de chacun des points. Cette méthode est utilisée pour des semis de points peu denses. Elle a notamment été utilisée pour construire le MNT de la campagne LiDAR 2010-2011⁴. Étant donné la forte densité de points acquises en 2022, cette méthode a été écartée.
- Le minimum : chaque pixel du MNT prend la valeur du point le plus bas. Cette méthode couramment utilisée pour construire les MNT permet par exemple de mieux identifier les réseaux hydrographiques. Dans le cas de l'utilisation de semis de points denses, la probabilité que le point bas soit une particularité de la topographie (ex : trou dans le sol) peut être importante.
- La moyenne : chaque pixel du MNT prend la moyenne altimétrique des points. Cette méthode a été retenue dans la génération du MNT issue de la présente prestation. Elle permet d'intégrer la variabilité des points d'un semis point dense. C'est en outre, la méthode utilisée par l'IGN pour le calcul du MNT issu du programme LiDAR HD.
- Le maximum : la méthode du maximum retient la valeur du point le plus haut. Cette méthode est peu utilisée dans la génération de MNT. Elle peut néanmoins avoir un intérêt si par exemple l'objectif est de mettre en avant des barrières à l'écoulement.

Pour illustrer les différences obtenues (Figure 26) selon différentes méthodes de création de MNT à 1m, des profils topographiques ont été comparés pour 3 méthodes de calculs (minimum, moyenne, maximum) et pour deux jeux de données (1/uniquement les points sol, 2/points sol + points muret).

⁴ Bacq N., 2013. Projet LiDAR estuaire de la Seine – Acquisition, contrôle qualité et produits disponibles. Etude réalisée par le GIP Seine-Aval, 41p

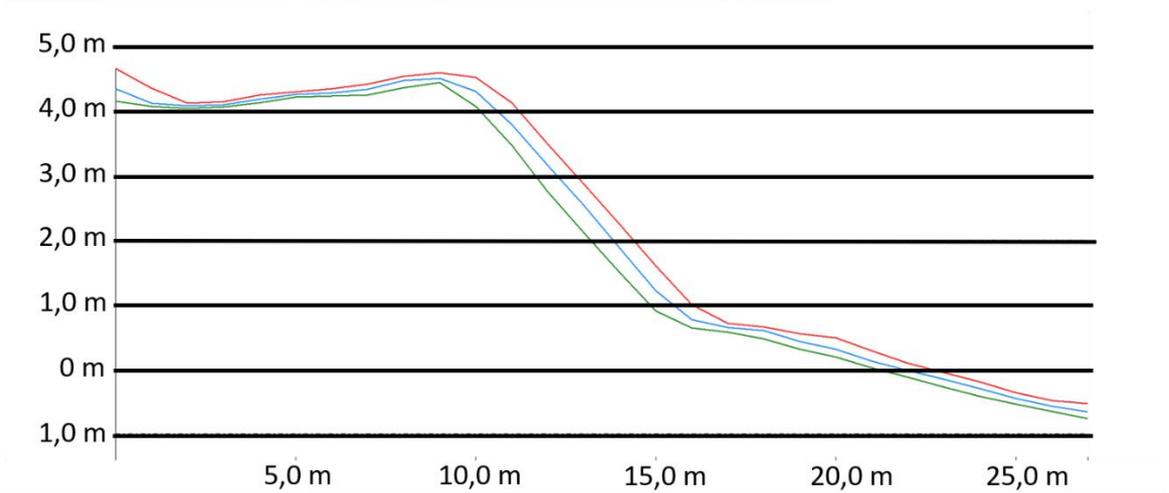
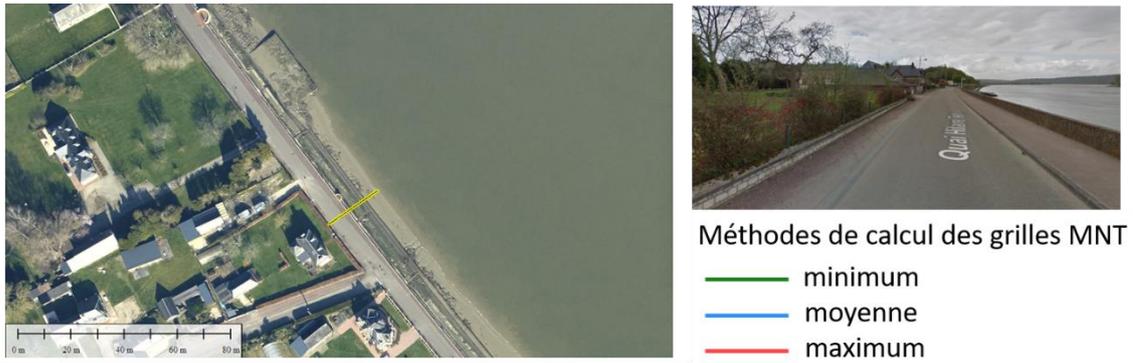


Figure 26: illustration du calcul d'un MNT sur une berge surmontée d'un muret anti-inondation selon différentes méthodes de calcul en utilisant le semis de points sol.

Les écarts sont importants sur les zones de fortes pentes (jusqu'à 1m). Sur les zones planes et dures, les écarts sont plus faibles.



MNT calculés par la méthode du point le plus haut en intégrant les points :

- des classes « sol » et « muret »
- La classe « sol »

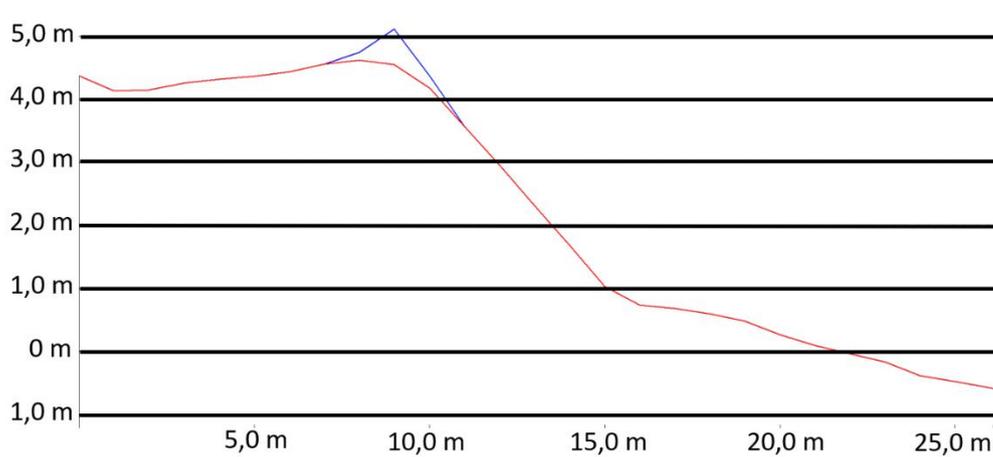


Figure 27: illustration du calcul d'un MNT sur une berge surmontée d'un muret anti-inondation selon les sources de données : semis de points sol et semis de points sol + muret anti-inondation.

Dans cet exemple, la prise en compte des murets est bien modélisée si l'on considère la méthode du point le plus haut (maximum) et que l'on intègre la classe de points « murets ».

Cet exemple permet de mettre en avant la nécessité d'adapter la méthode de calcul de la grille à l'objectif d'utilisation des données.

ANNEXE 3 : COMPARAISON DES DONNEES MNT 2010/2011 ET 2022

La comparaison de deux jeux de données doit permettre d'observer les évolutions topographiques du terrain sur une période donnée. Les incertitudes liées à la technique LiDAR et au traitement des données, ainsi que la nature du terrain étudié, influencent la précision à laquelle peut être réalisée l'analyse des évolutions.

Le cumul de ces incertitudes est difficilement quantifiable. Elles dépendent tout d'abord du système d'acquisition de la donnée (capteur, centrale inertielle), de son paramétrage, ainsi que des conditions d'acquisition (déroulement du vol). Dans le cas d'une comparaison de deux jeux de données, l'évolution des technologies peut engendrer des niveaux de précisions différents. A l'issue de l'acquisition, le semis de points fait l'objet d'un calage géométrique et d'une classification, ces deux étapes engendrent également de l'incertitude. Enfin, comme évoqué précédemment, la méthode de calcul des grilles est un élément de méthode à harmoniser pour limiter les artefacts liés à cette étape du traitement des données. (voir Annexe 2).

Selon la densité des points LiDAR (nbre de points/m²) des différents jeux de données et la nature du terrain, des micro-modifications temporaires de celui-ci liées aux usages du sol (pratique agricole, dégradation de bitumes...) peuvent impacter les résultats du calcul du MNT. La comparaison des données met dans ce cas en évidence des différences sans que la topographie du sol n'ait réellement évolué.

Les MNT 2010/2011 et 2022 n'ont pas la même généalogie. Les densités de points LiDAR acquises sont différentes (2010/2011 : 3 pts/m²-15 pts/m² sur les rives de Seines ; 2022 : > 20 pts/m² sur l'ensemble de la vallée). Pour cette raison, la méthode pour générer le MNT n'est pas la même (2010/2011 : triangulation ; 2022 : moyenne).

Les contrôles qualité de la géométrie des données LiDAR opérés sur les jeux de données de 2010/2011 et de 2023 font ressortir les résultats suivants :

- Les classes de précisions sont du même ordre de grandeur (2010/2011 : ≈7 cm, 2022 : ≈ 5 cm)
- En 2010/2011, les résultats montrent que, dans la majorité des cas, les points LiDAR se situent à une altitude inférieure aux points de contrôle (≈65% pour 2010, ≈55% pour 2011).
- A l'inverse, en 2022, les résultats montrent que les points LiDAR se situent en majorité à une altitude supérieure aux points de contrôle (voir la Figure 28).



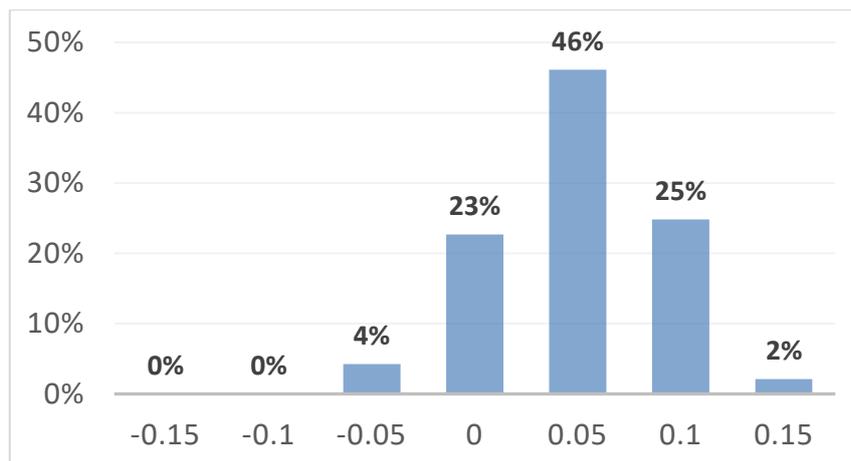


Figure 28 : Répartition des écarts altimétriques (en m) relevés aux points de contrôle pour les données LiDAR 2022.

La comparaison des MNT 2010/2011 et 2022 semble indiquer que le référentiel 2022 se positionne topographiquement au-dessus du référentiel 2010-2011. Ce résultat serait cohérent avec les résultats du contrôle qualité des deux jeux de données (voir le § 4.1.2). La Figure 29 illustre ce constat sur deux types de nature de sol différents.

Cet écart serait donc uniquement lié à la technique LiDAR et aux méthodes de traitement des données. Cet écart varie dans l'espace et n'est pas quantifié.



Figure 29: Illustration d'une comparaison des MNT 2022 et 2010-2011 (terrain semis-naturel à gauche, route à droite)

Ce simple constat démontre que **pour statuer sur des évolutions de faible ampleur** (de l'ordre de 20 cm), il s'avère nécessaire de définir une méthodologie pour la comparaison des données adaptées au contexte de l'étude (nature du sol, emprise spatiale, disponibilités de points acquis par géomètre pour recaler localement les données LiDAR...). La méthode devra permettre de fixer un seuil minimum pour lequel les différences observées sont liées à des évolutions de la topographie.



La comparaison des jeux de données 2022 et 2010-2011 mis à disposition permet d'**observer directement des évolutions plus significatives**. La Figure 30 illustre un exemple d'évolution (recul de la berge de l'ordre de 15 m) au niveau de la commune de Bardouville.

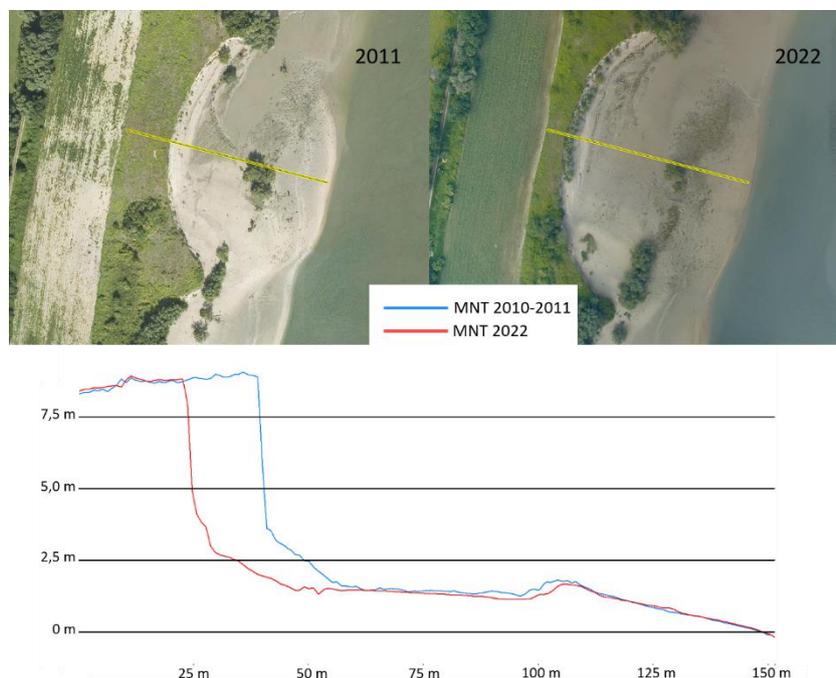


Figure 30 : Recul de la berge au niveau de la commune de Bardouville

Ces informations illustrent les limites inhérentes au système d'acquisition et aux méthodes de traitement des données et invite l'utilisateur à choisir une méthode de comparaison adaptée à ses objectifs.

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Hangar C – Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1

Tél : 07 45 03 46 36
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

GIP Seine-Aval, 2023. Topographie haute-résolution de la vallée de la Seine Normande - Données LiDAR et ortho-photographies 2022 – Rapport technique – 38 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

