

# LE PROGRAMME LIDAR HD DE L'IGN

LE LIDAR C'EST MAGIQUE...MAIS IL Y A QUAND MÊME EU QUELQUES DÉFIS  
À RELEVER

**FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2024**

**ALEXANDRE PAUTHONNIER, IGN**

---

# Sommaire

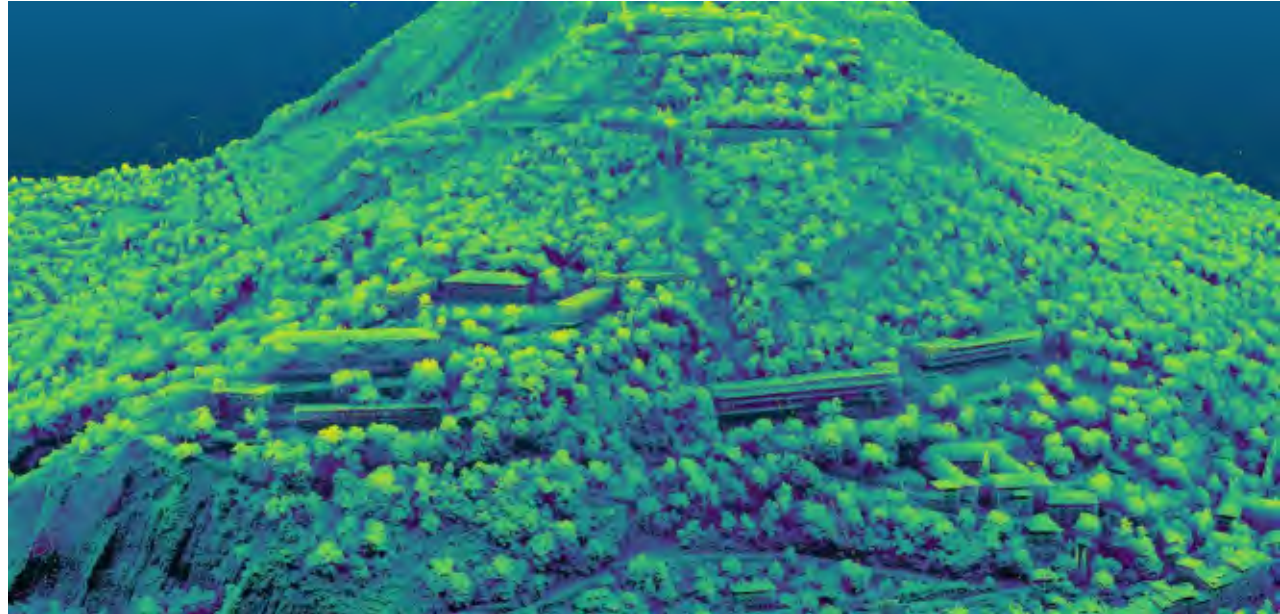
1. Le programme en bref
2. Le défi “acquisition”
3. Le défi “traitement”
4. L’avancement
5. Les perspectives

An aerial photograph of a dam situated in a lush, green valley. The dam is a long, low structure with a central spillway. The surrounding area is densely forested with various shades of green. The text "1. Le programme en bref" is overlaid in white on the left side of the image.

# 1. Le programme en bref

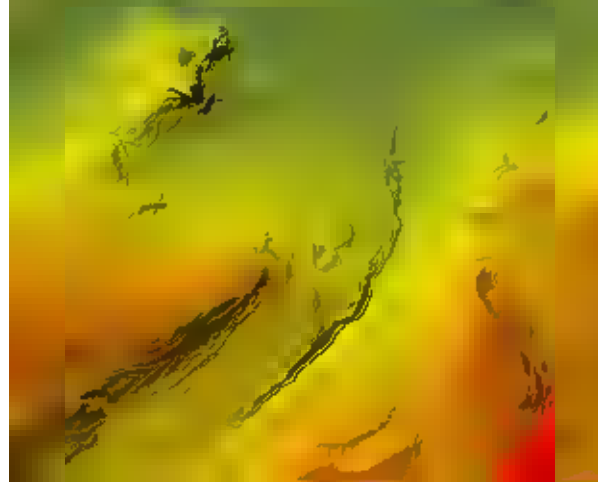
# Le programme lidar HD de l'IGN

- Première couverture lidar aéroportée complète de l'ensemble du territoire (hors Guyane Française)
- En 5 ans (2020-2025)
- **Cartographie 3D précise, détaillée et homogène** du terrain (sol et sursol)



# Le programme lidar HD de l'IGN

- Première couverture lidar aéroportée complète de l'ensemble du territoire (hors Guyane Française)
- En 5 ans (2020-2025)
- **Cartographie 3D précise, détaillée et homogène** du terrain (sol et sursol)



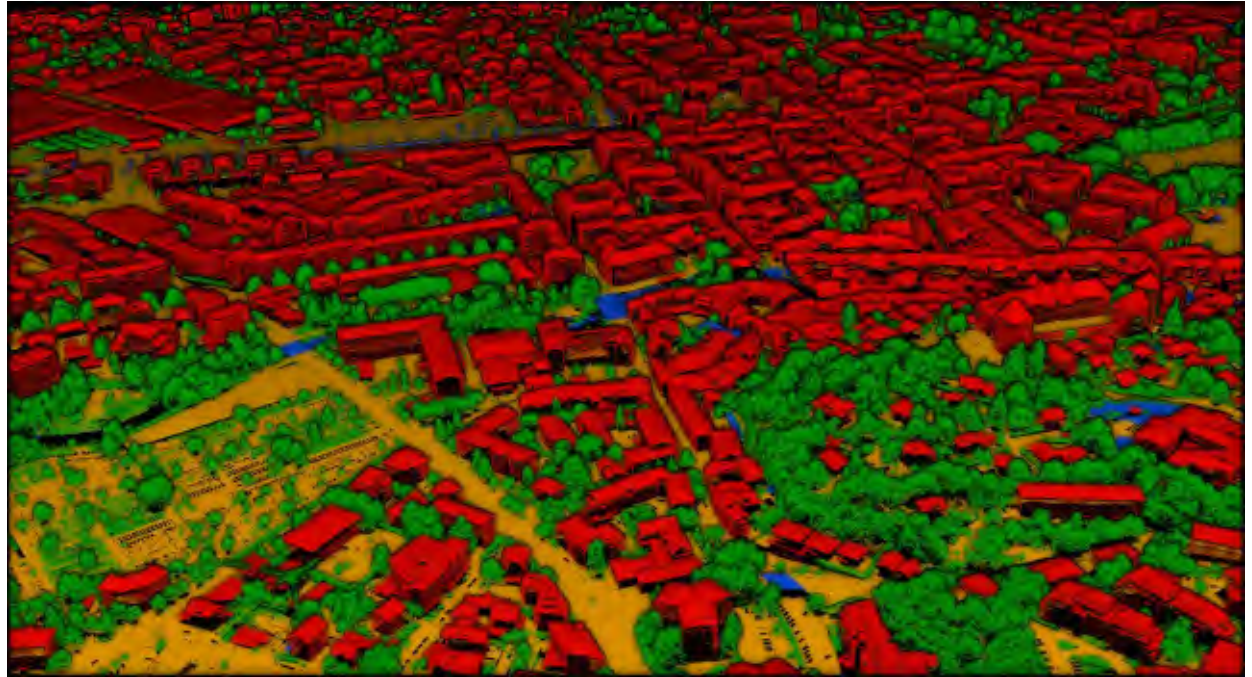
# Le programme lidar HD de l'IGN

- Première couverture lidar aéroportée complète de l'ensemble du territoire (hors Guyane Française)
- En 5 ans (2020-2025)
- **Cartographie 3D précise, détaillée et homogène** du terrain (sol et sursol)



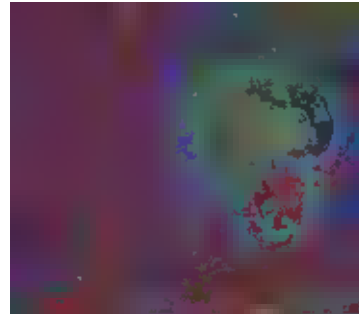
# Le programme lidar HD de l'IGN

- Première couverture lidar aéroportée complète de l'ensemble du territoire (hors Guyane Française)
- En 5 ans (2020-2025)
- Cartographie 3D précise, détaillée et homogène du terrain (sol et sursol)
- Un programme innovant levier de transformation pour l'action public
- Un enjeu de rationalisation
- Diffusion open data
- De multiples défis à relever



# Une cartographie 3D pour quoi faire?

- Socle indispensable pour la conduite de l'action publique en matière de
  - prévention des risques
  - gestion des espaces forestiers
  - gestion des espaces agricoles
  - aménagement du territoire (besoin renforcé par les enjeux de transition écologique et énergétique)
  - protection de la biodiversité
  - sécurité
  - connaissance patrimoniale (archéologie)
- Socle 3D pour le futur Jumeau Numérique National
- Montée en qualité des référentiels de données géographiques





# 4 objectifs / 4 chantiers



LIDAR aéroporté  
Mise en géométrie  
Densité min de 10  
pt/m<sup>2</sup>  
IGN + prestataires +  
partenaires



Classification (aussi  
automatique que  
possible, IA inside)  
Calcul des modèles  
numériques



Hébergement dans  
la Géoplateforme et  
diffusion des  
données en  
téléchargement et  
flux



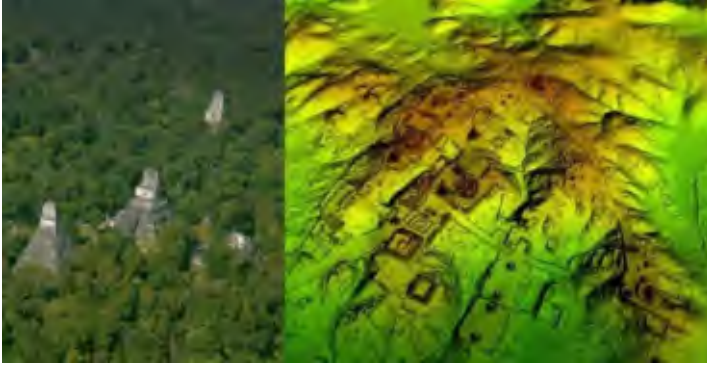
Aide aux  
utilisateurs à  
s'approprier ces  
nouvelles données  
Création d'une  
communauté

An aerial photograph of a lush green valley. A river flows through the center, with a dam structure visible in the middle ground. The surrounding hills are covered in dense vegetation. The text '2. Le défi d'acquisition' is overlaid in white on the left side of the image.

## 2. Le défi d'acquisition

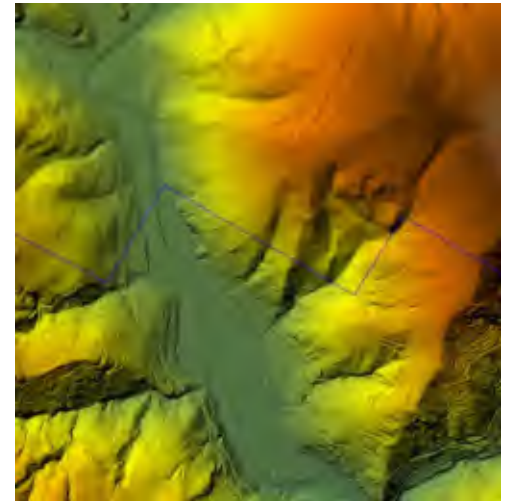
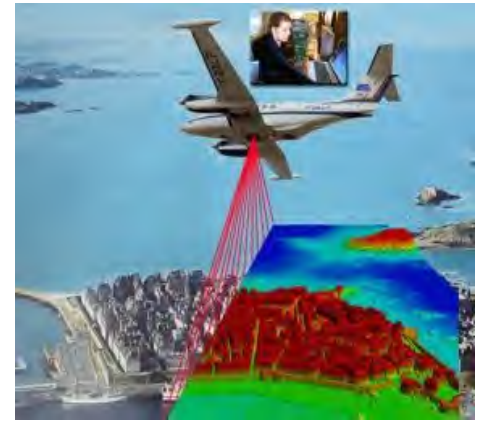
# Lidar is magic but

Pour le topographe qui souhaite produire une cartographie 3D d'ensemble détaillée et précise le lidar aéroporté c'est une technique révolutionnaire !



Le lidar permet de réaliser à grande échelle des levés 3D avec une productivité et une qualité meilleures que la photogrammétrie

Pour couvrir un territoire comme la France à **10 pt/m<sup>2</sup>** minimum, il faut néanmoins compter **7000 heures** de vol ! On ne peut donc pas parler de **topographie instantanée** !

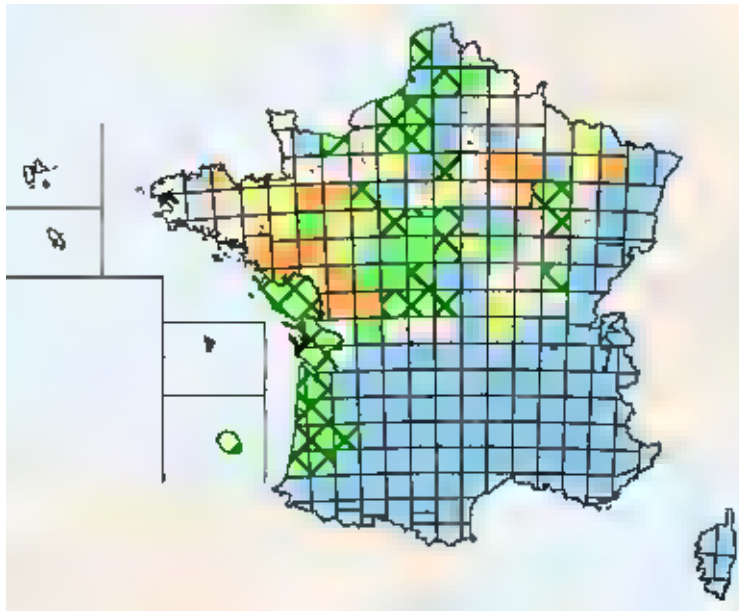


# Organisation des acquisitions

Constitution d'une task force

- IGN, coordinateur
- 4 groupements de prestataires
  - Avineon/APEI
  - Eurosense/SFS
  - Geofit/Geofly
  - Sintegra/Pixair/Bluesky

Programmation multi-saisons



Partition du territoire en blocs de 50\*50 km<sup>2</sup>  
(240)

De 15 à 40h par bloc

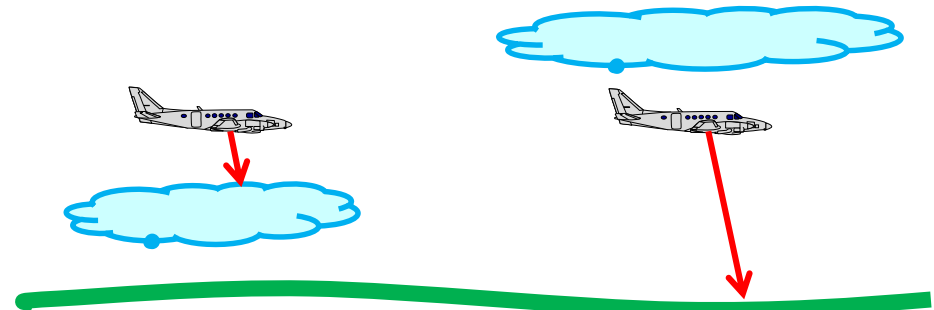
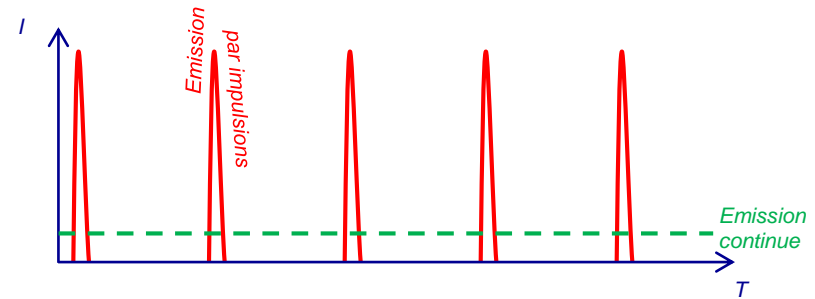


# Principe du LiDAR aéroporté

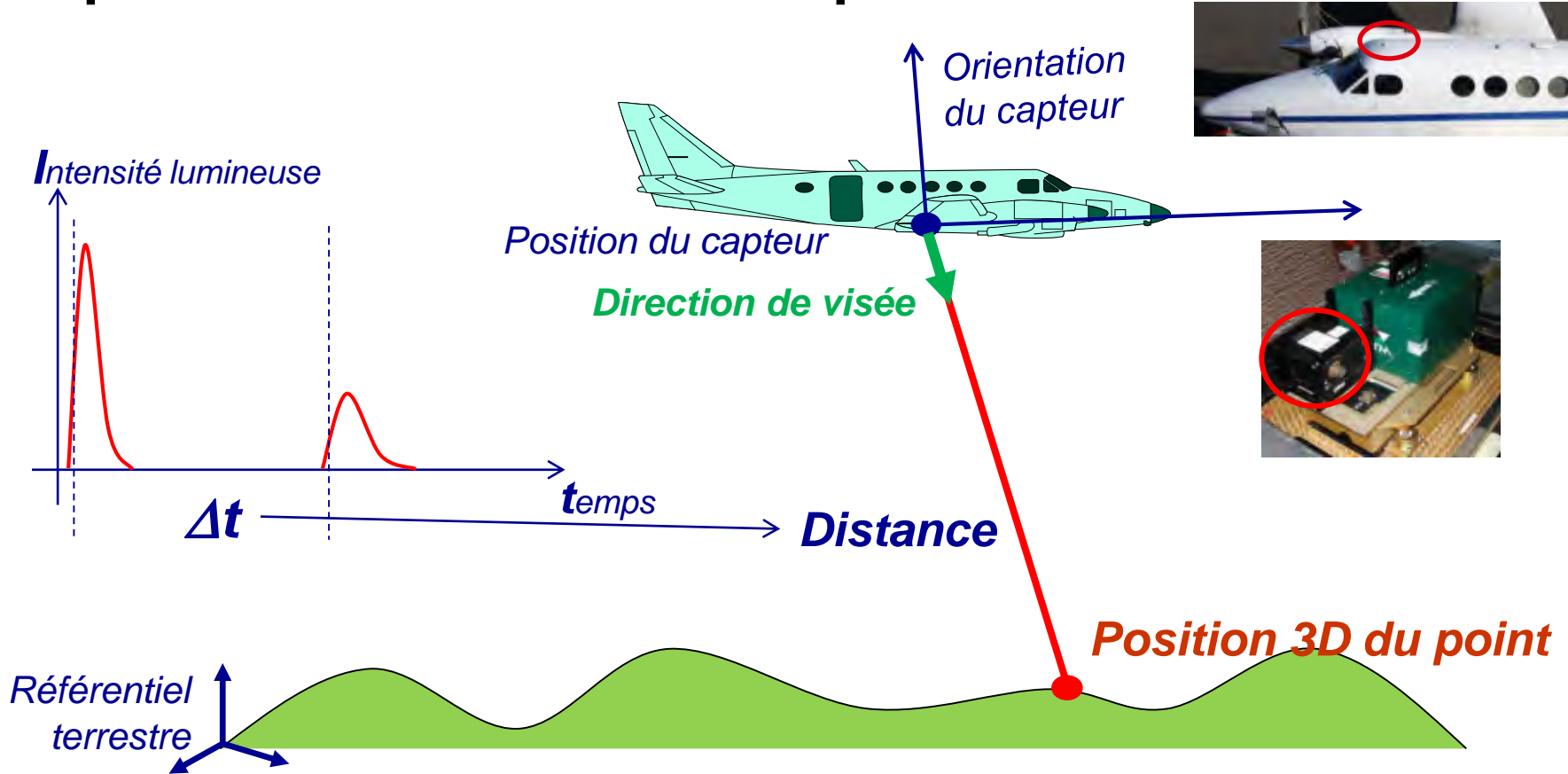
Lidar = Light Detection and Ranging

Système actif, qui mesure des distances par émission-réception de lumière

- 📍 Embarqué dans un avion, un hélicoptère ou un drone
- 📍 Emet vers le sol des impulsions laser (1064 nm pour les lidar topo) à haute fréquence (X00 kHz à qqs Mhz)
- 📍 Détecte les échos retours et calcule à la volée la distance aux éléments du terrain ayant renvoyé le signal



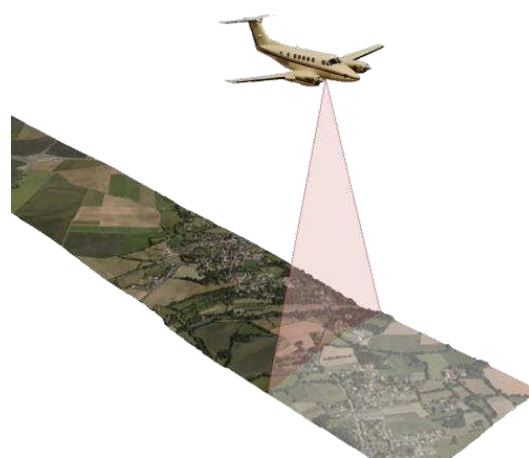
# Ce qui nous intéresse c'est la position 3D ...



# Le système de balayage

## Pour couvrir une bande de terrain sous l'axe de vol

- En général balayage dans un plan perpendiculaire à la direction du vol.
- Variation périodique de la direction d'émission des impulsions
- Système optique mobile (miroir ou prisme)

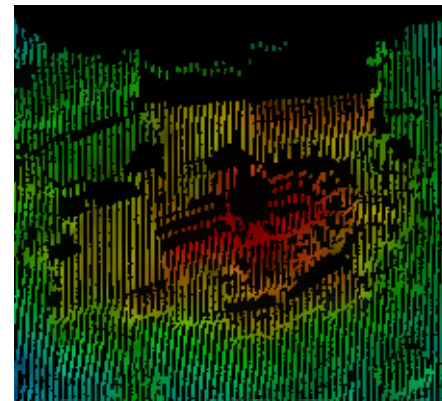
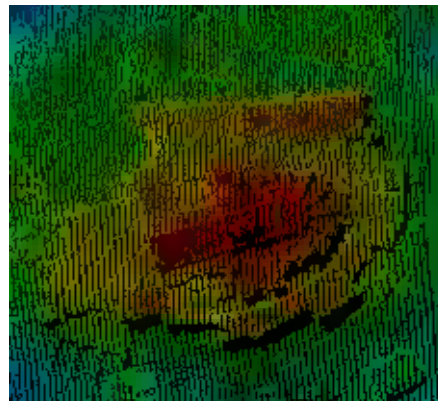


## Balayage latéral

- Parties cachées latérales systématiques
- Parties cachées longitudinales selon l'inclinaison du capteur et les variations de trajectoires

## Balayage circulaire

- Parties cachées latérales (un peu)
- Aucune partie cachée longitudinale



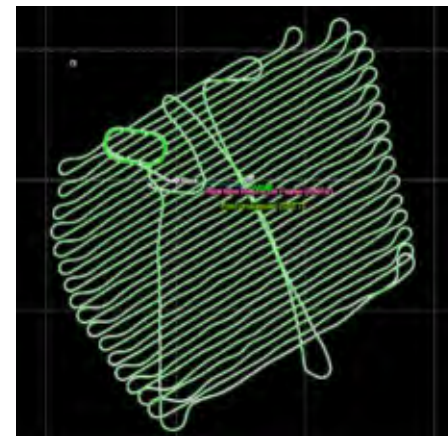
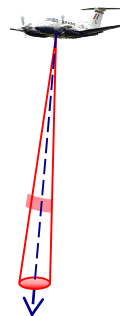
# Un levé 3D oui, mais quelle précision?

## La précision dépend

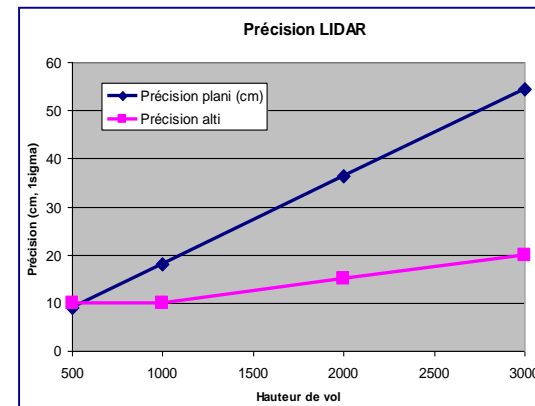
- 📍 au premier ordre de la **trajectographie** et de la **hauteur de vol** (l'erreur de positionnement liée à l'imprécision angulaire augmente linéairement avec la hauteur de vol)
- 📍 au second ordre de la divergence du rayon, de l'angle de scan et du terrain (topographie, réflectivité des cibles)

## Pour le programme, les spécifications imposent

- 📍 Une **précision altimétrique absolue** meilleure que **10 cm**
- 📍 Une **précision planimétrique absolue** meilleure que **50 cm**
- 📍 Une précision altimétrique relative meilleure que 5 cm
- 📍 Une précision planimétrique relative meilleure que 25 cm



trajectographie



Abaques précision vs hauteur de vol pour Optech ALTM3100



# Capteurs utilisés pour le programme

Riegl VQ-780 II / VQ-780 II S

Leica Terrain Mapper

Leica City Mapper

Optech T2000



# Paramètres d'acquisition types

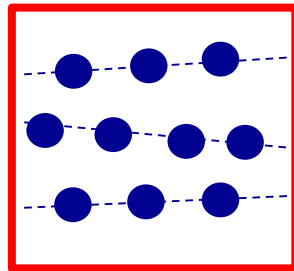


Vitesse de l'avion  
72 m/s ; 260 km/h ; 140 kts

Fréquence d'impulsion  
1 200 kHz  
Fréquence de balayage  
100 Hz  
Recouvrement entre bandes  
30%

Hauteur de vol  
1 900 m  
6 250 ft

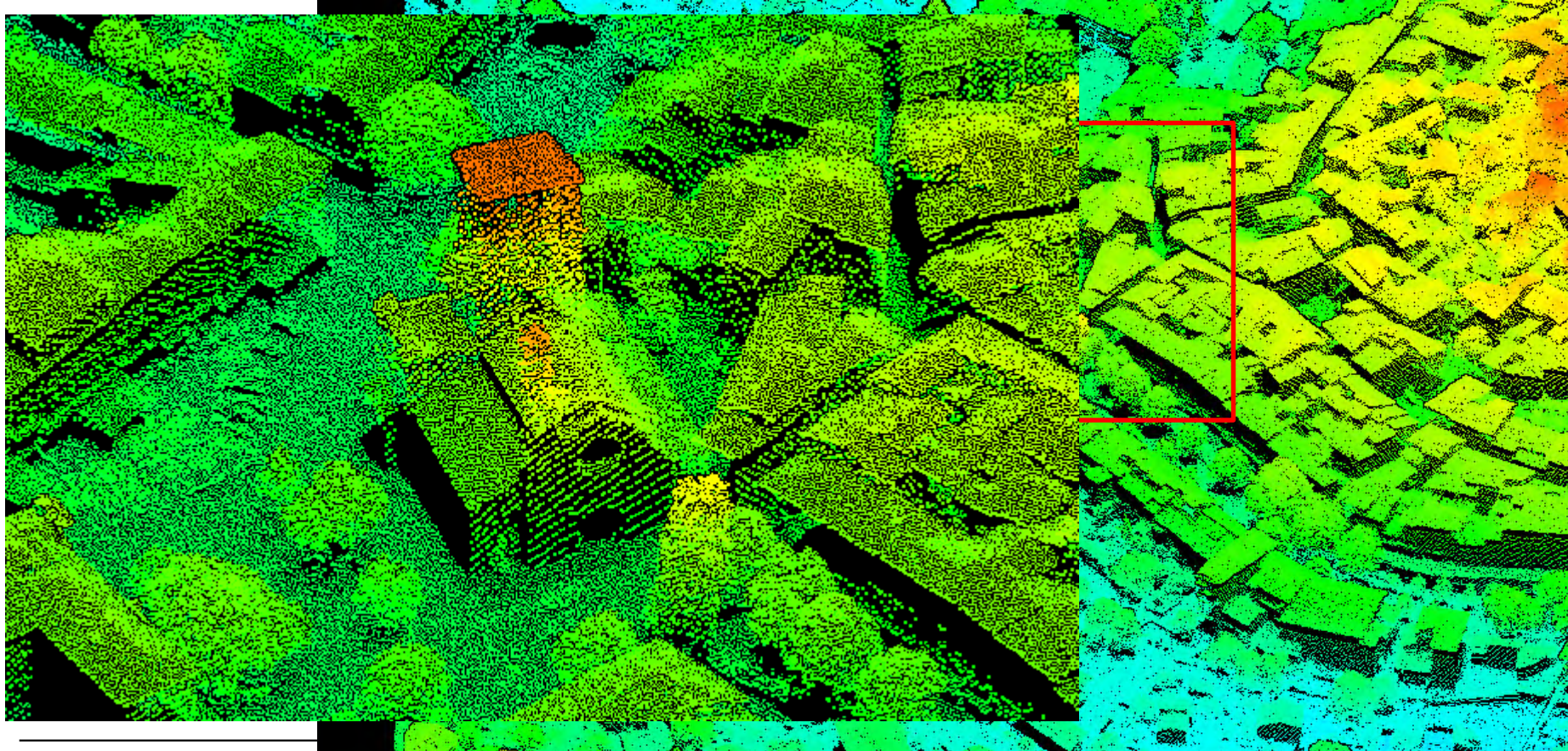
Angle de scan  
30°



Point distribution (Single Sensor)	
Cross track point spacing at nadir:	0.23
Down track point spacing at nadir:	0.36
Point density at nadir	12.26 p/m <sup>2</sup>

Fauchée  
1021 m

# Une acquisition type

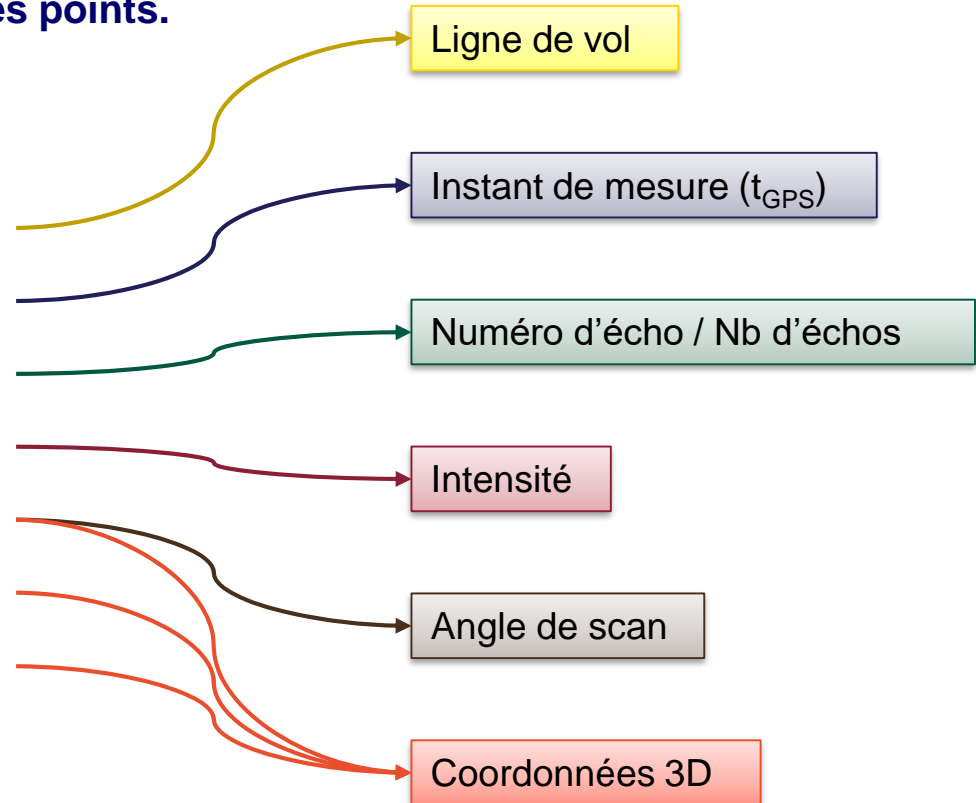


# Déployer une assurance qualité rigoureuse

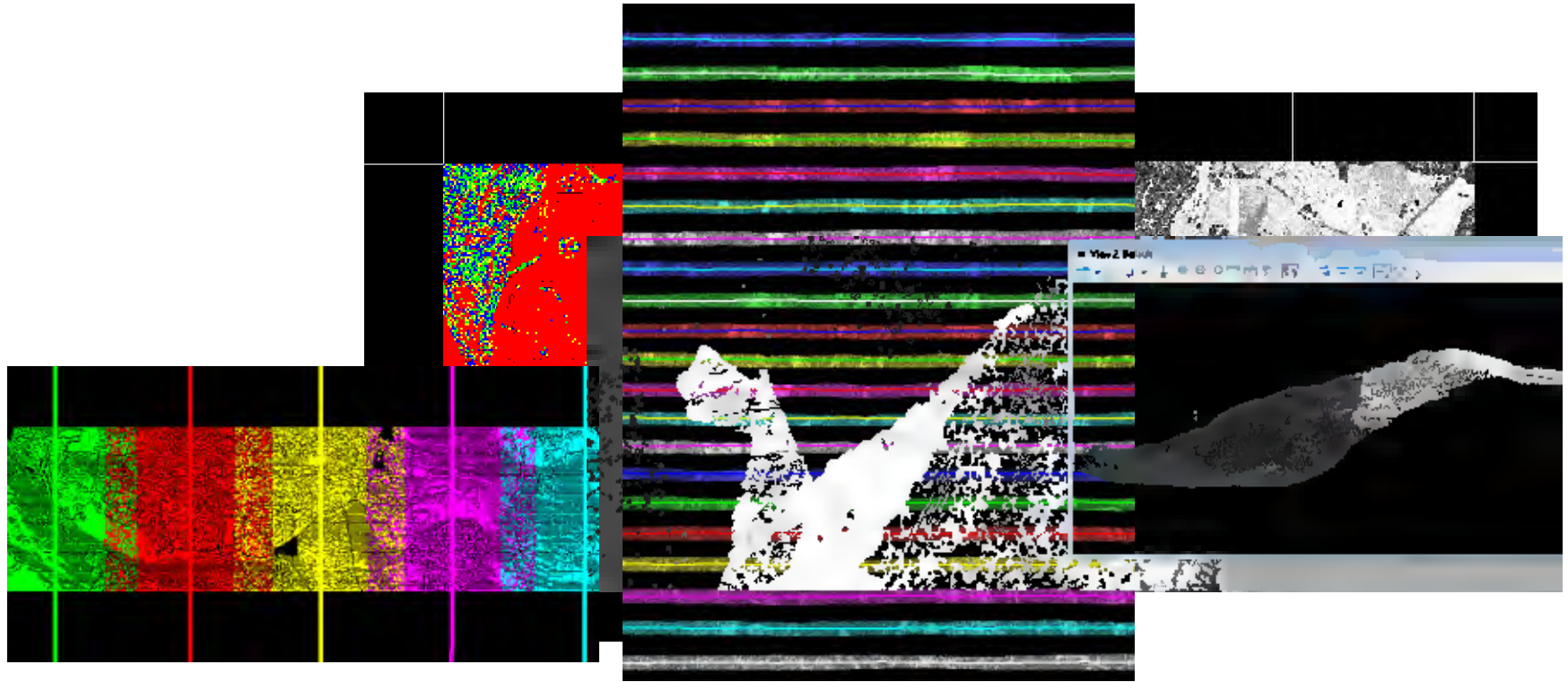
Enjeu de vérifier le respect des spécifications (densité, précision) et la cohérence des informations enregistrées au niveau des points.

## Un écho = une mesure

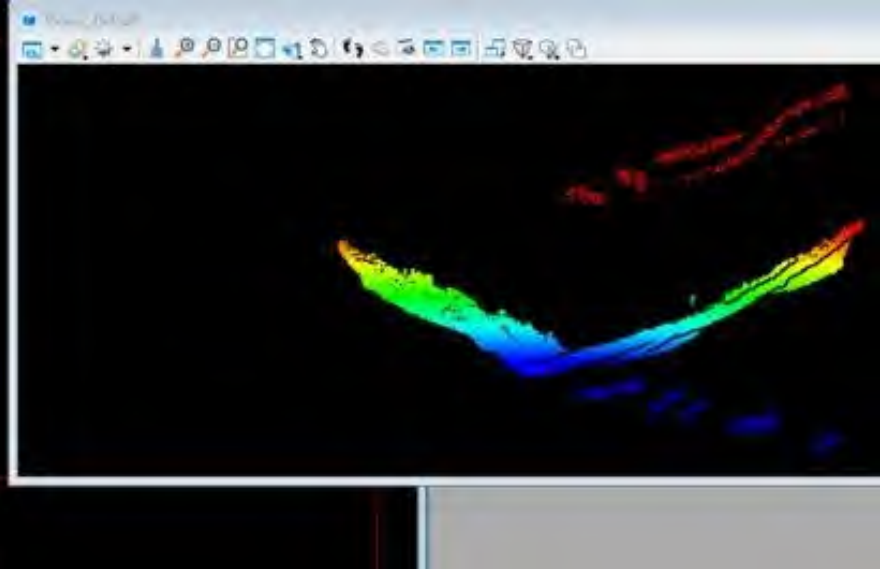
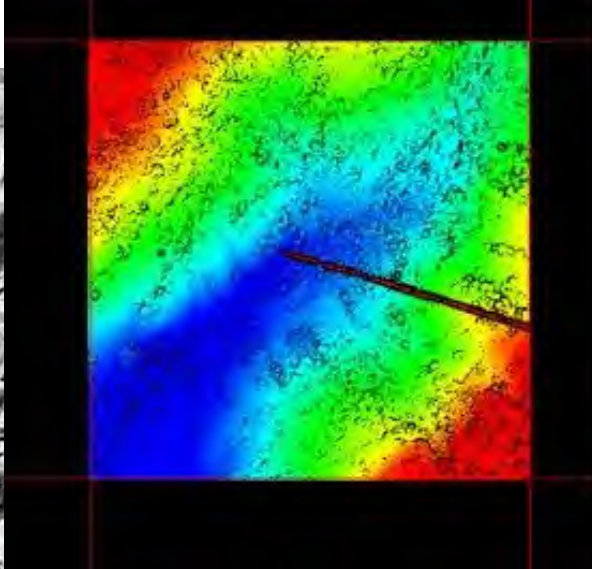
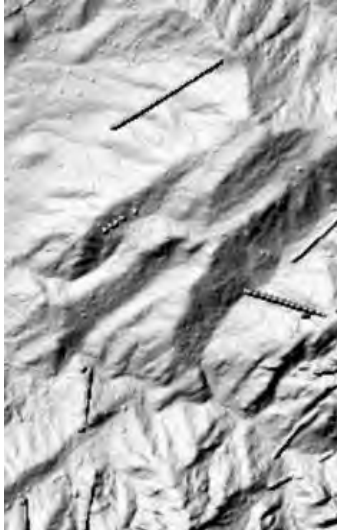
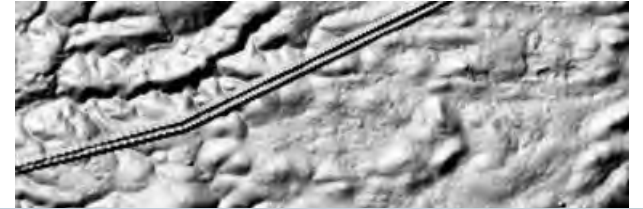
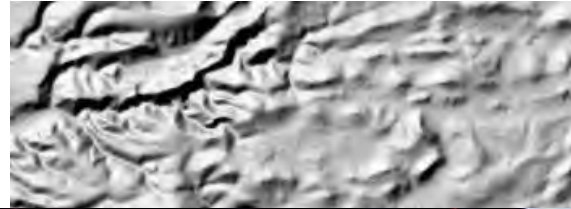
- ▶ Sur un axe de vol donné
- ▶ Une impulsion laser à un instant donné  $t_0$
- ▶ Un  $i^{\text{ème}}$  écho détecté à  $t_i = t_0 + \Delta t$
- ▶ Avec une intensité  $I$
- ▶ Une position du système de balayage à  $t_0$
- ▶ Une distance calculée  $d \approx c \cdot \Delta t / 2$
- ▶ Une position/orientation du capteur à  $t_0$



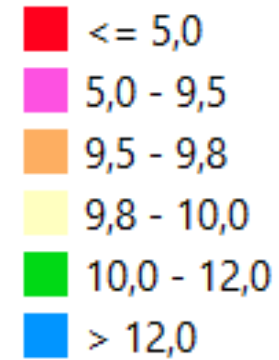
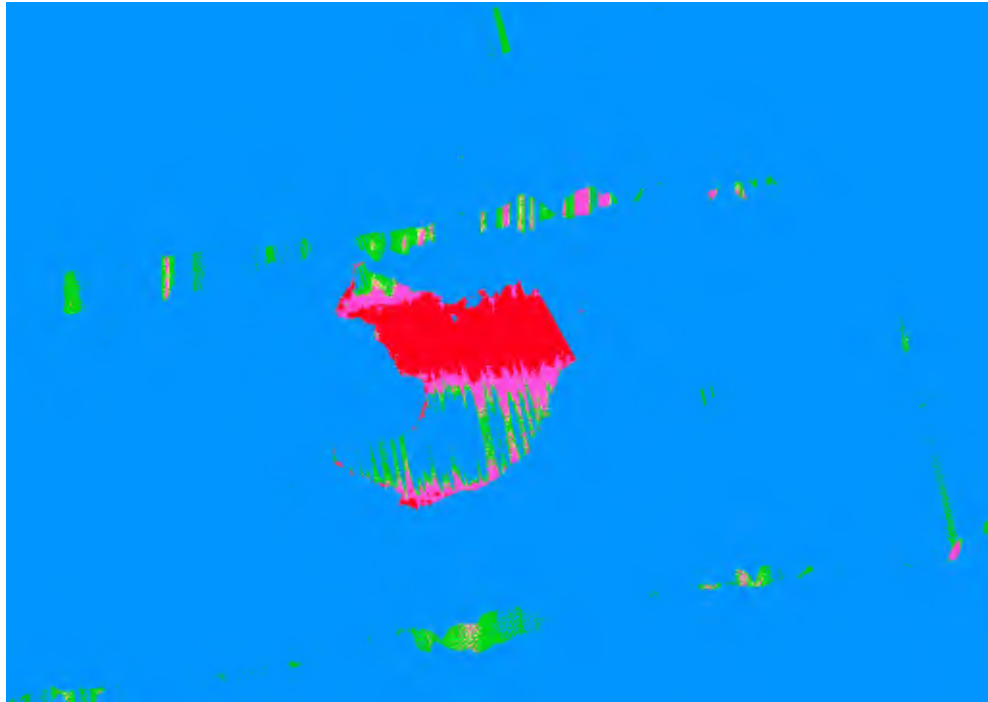
# Contrôle des informations portées par les points



# Filtrage des artéfacts

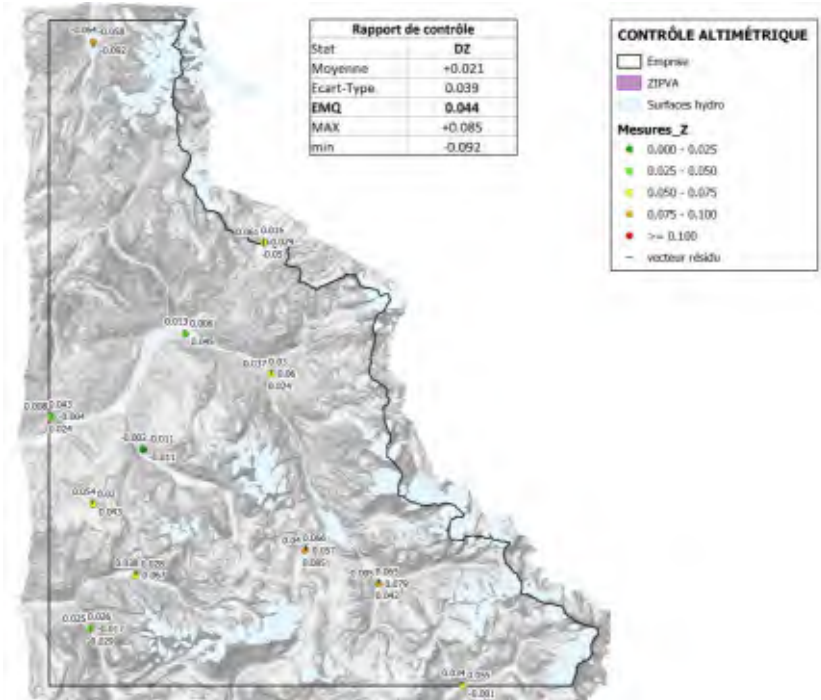
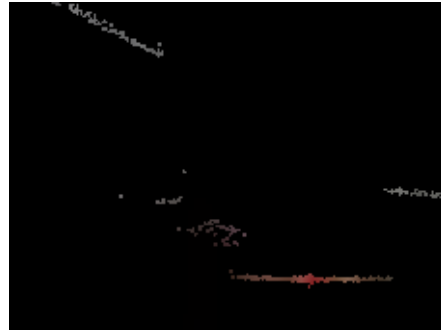


# Complétude et densité



# Contrôle géométrique

- Contrôle de la précision altimétrique absolue → vérification du calage du nuage de points avec les mesures terrain  
Altimétrie **EMQ**  $\leq 10\text{cm}$

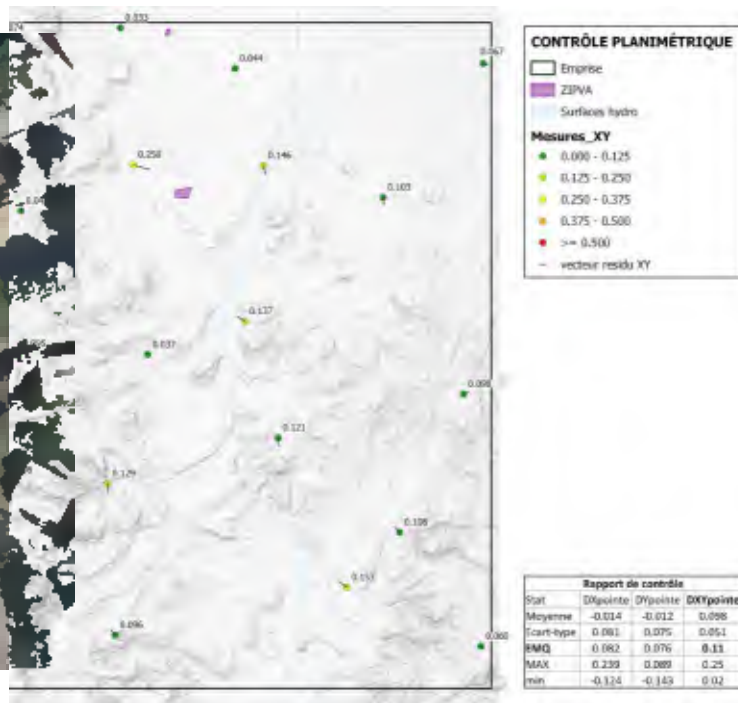




# Contrôle géométrique

- Contrôle de la précision planimétrique absolue → vérification du calage du nuage de points avec les mesures terrain

Planimétrie **EMQ** <= 50cm

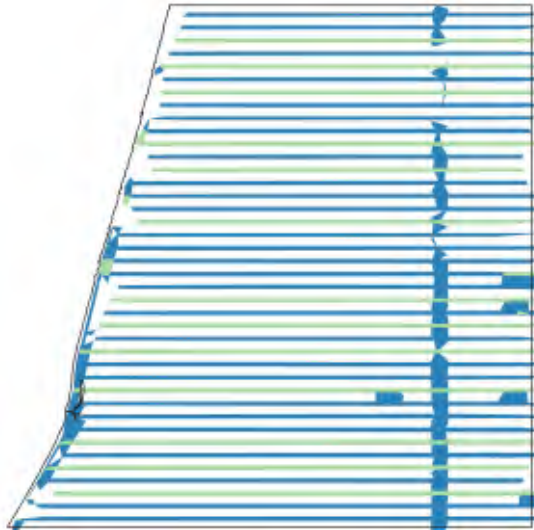
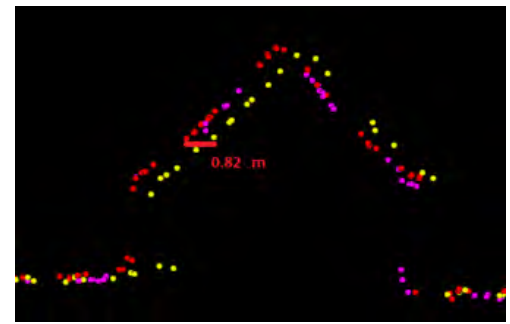


# Contrôle de la précision relative

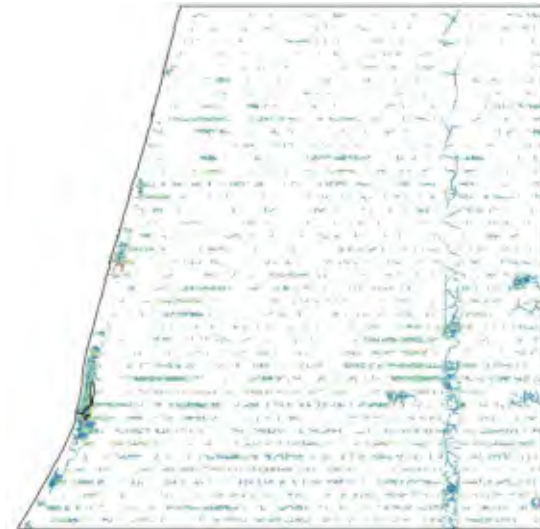
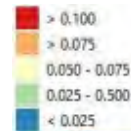
- Contrôle de la précision relative → vérification du calage des bandes par détection et comparaison de lignes caractéristiques du terrain dans les zones de recouvrement

Altimétrie EMQ  $\leq$  5cm

planimétrie EMQ  $\leq$  25cm



Moyenne des écarts altimétrique par inter-bande



Écarts altimétrique par ligne homologue

An aerial photograph of a lush green valley. A river flows through the center, with a dam structure visible in the middle ground. The surrounding hills are covered in dense forest. The text '3. Le défi du traitement' is overlaid in white on the left side of the image.

### 3. Le défi du traitement

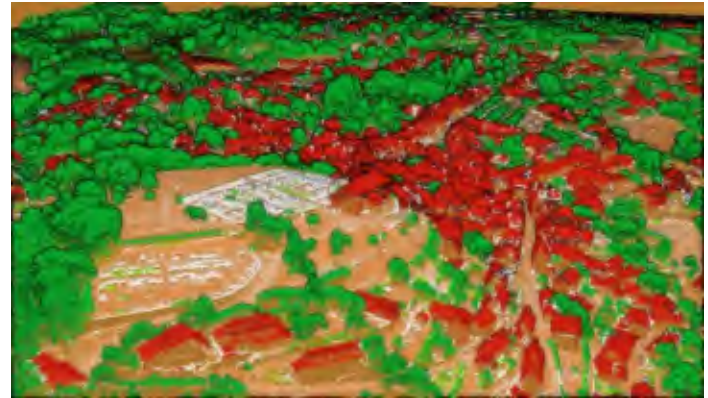
# Du nuage brut au nuage classé

Pour réellement produire une **cartographie en 3D** il est nécessaire d'identifier les éléments du terrain.

**Il s'agit ici de classer l'ensemble des points**  
(pas uniquement les points sol)

C'est un **changement majeur** !! Les algorithmes précédemment utilisés et l'approche *première passe automatique pour dégrossir puis reprises manuelles pour finaliser* ne fonctionnent plus !!

Les délais et le budget du programme imposent de développer un processus de classification aussi **automatique** que possible



# Les méthodes usuelles de classification

<b>Utilisation des attributs des points du nuage</b>	Certains attributs donnent un indice pour la classification : numéro d'écho, intensité, RVBI, NDVI...	Souvent en « pré-classification » ou pour (in)valider le résultat d'un algo automatique.
<b>Algorithmes géométriques</b>	Analyse de la distribution spatiale locale des points du nuage	<ul style="list-style-type: none"><li>• Détection de fautes</li><li>• Classification du sol</li><li>• Classification de bâtiments</li><li>• Végétation</li><li>• Création de groupes</li><li>• ...</li></ul>
<b>Croisement avec des données externes</b>	Utilisation de données SIG existantes pour localiser/identifier des éléments <ul style="list-style-type: none"><li>• Axes de routes</li><li>• Emprises de bâtiments</li><li>• Zones d'eau</li><li>• Sursol pérenne</li><li>• ...</li></ul>	Souvent en « pré-classification »
<b>Méthodes manuelles</b>	Analyse visuelle, sélection manuelle et affectation d'une classe.	Correction des défauts des autres méthodes.











# La cible

- Une **classification** qui répond aux besoins prioritaires des commanditaires sponsors mais potentiellement **multi-usages**.

• **9 classes** adaptée au calcul de MNT, MNS, à toutes les problématiques liées au bâti ou à la végétation

- Sol
- Végétation basse, moyenne et haute
- Eau
- Pont
- Bâtiment
- Sursol pérenne (Antennes, Eoliennes, Lignes électriques...)
- Artefact

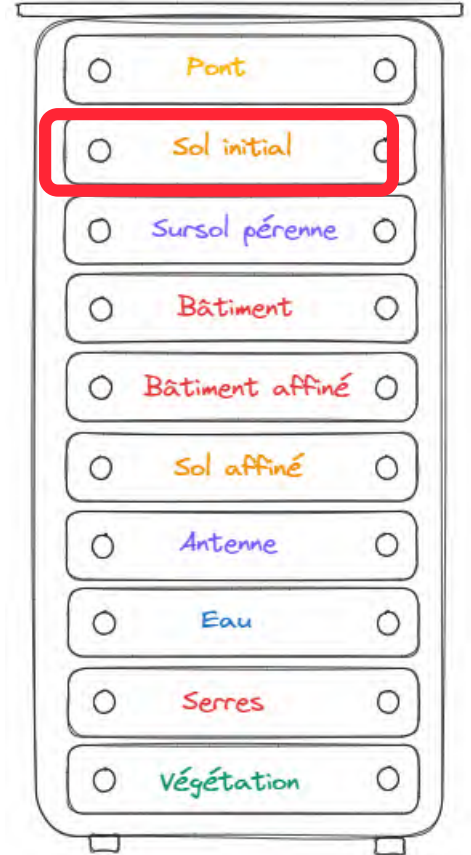
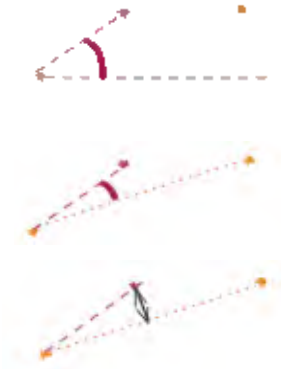
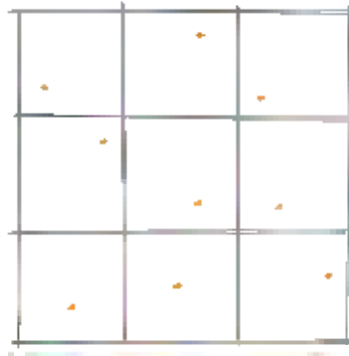
. Un process **automatique** qui combine les méthodes usuelles de classification et **l'IA** (algorithmes de deep learning utilisant des données d'apprentissage).

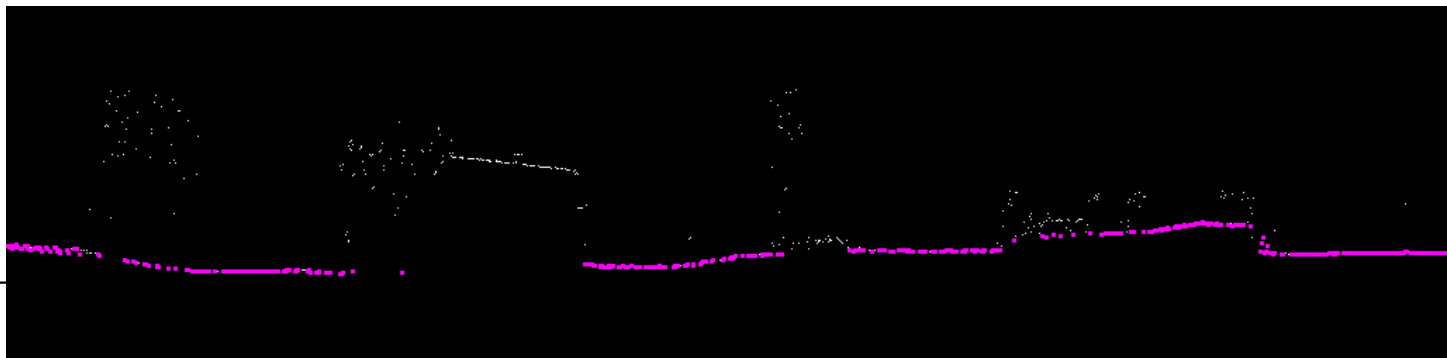
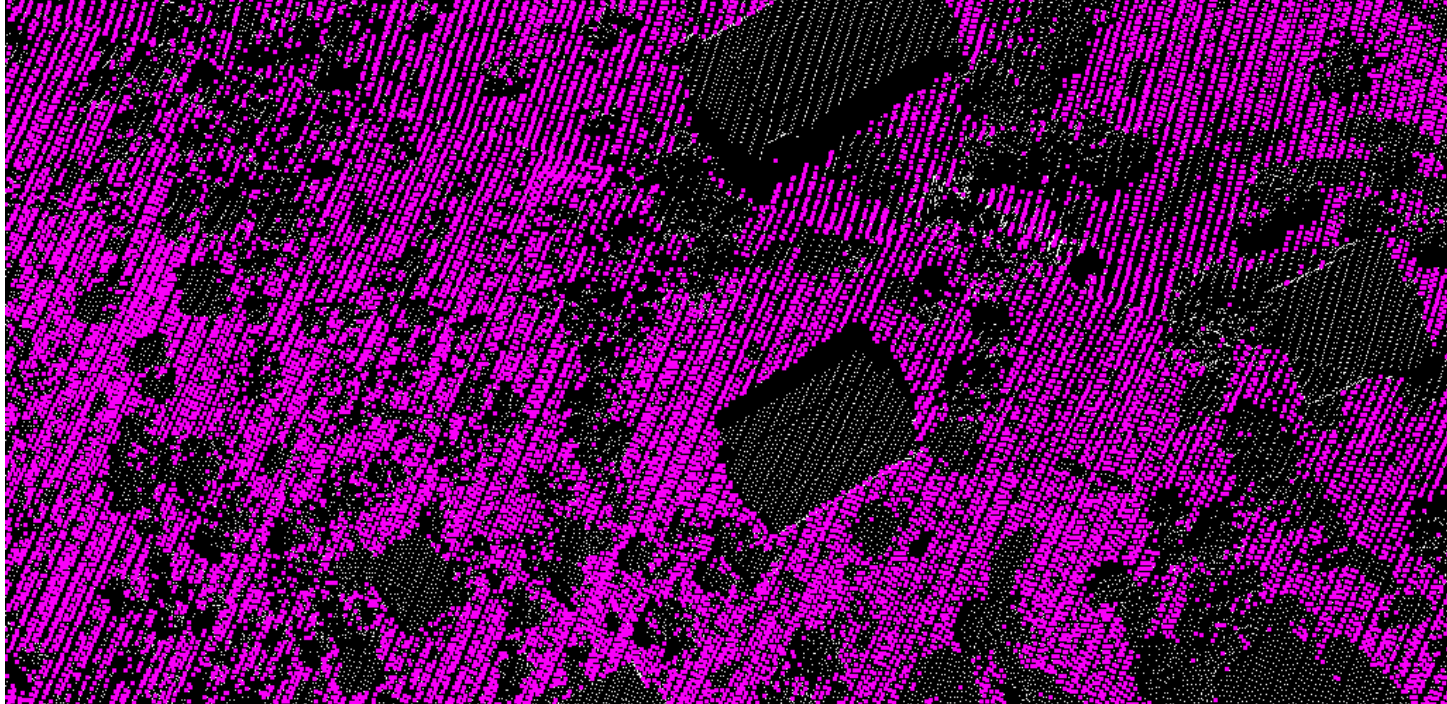
1	Non classes	
2	Sol	
3	Vegetation basse	
4	Vegetation intermediaire	
5	Vegetation haute	
6	Batiment	
9	Eau	
17	Tablier de Pont	
64	Sursol perenne	
65	Artefact	

# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

➤ **Des algorithmes de traitement classiques**, avec des méthodes déterministes de détection

- Sol initial :
  - Choix de points bas dans une grille (30m x 30m) hors bâti BD TOPO®
  - Triangulation à partir des points bas sous critères d'angle et de distance







# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

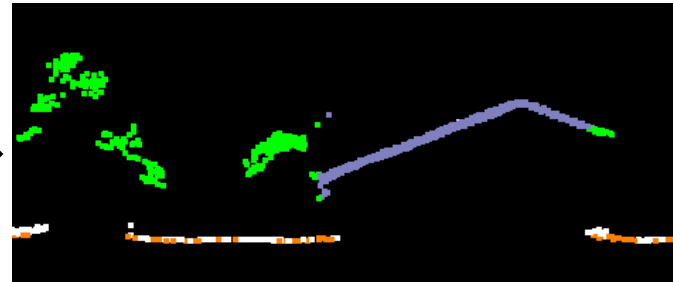
➤ **Des algorithmes de traitement classiques**, avec des méthodes déterministes de détection

- Bâtiment :
  - Recherche sur critères géométriques
  - Densification (murs, faitages, clochers...)

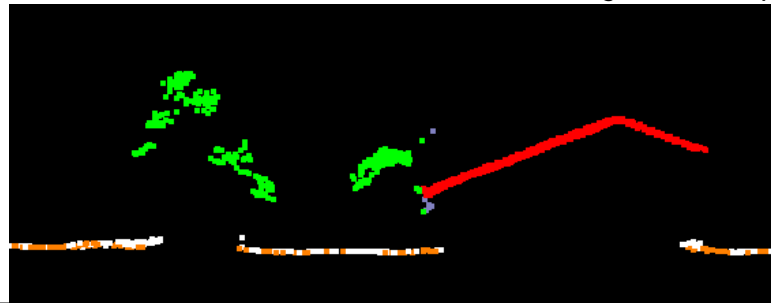
<input type="radio"/>	Pont	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Sol initial	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Sursol pérenne	<input type="radio"/>
<input checked="" type="radio"/>	Bâtiment	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Bâtiment affiné	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Sol affiné	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Antenne	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Eau	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Serres	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	Végétation	<input type="radio"/>



Points au-dessus du sol (●)



Index de végétation des points au-dessus du sol



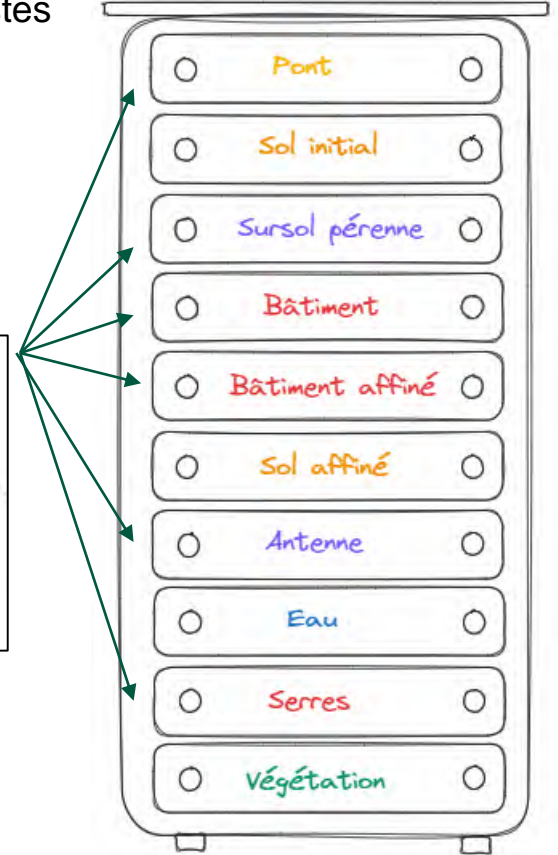
Recherche de plans

# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

- Des algorithmes de traitement classiques, avec des méthodes déterministes de détection
- **Des données externes :**
  - BD TOPO®

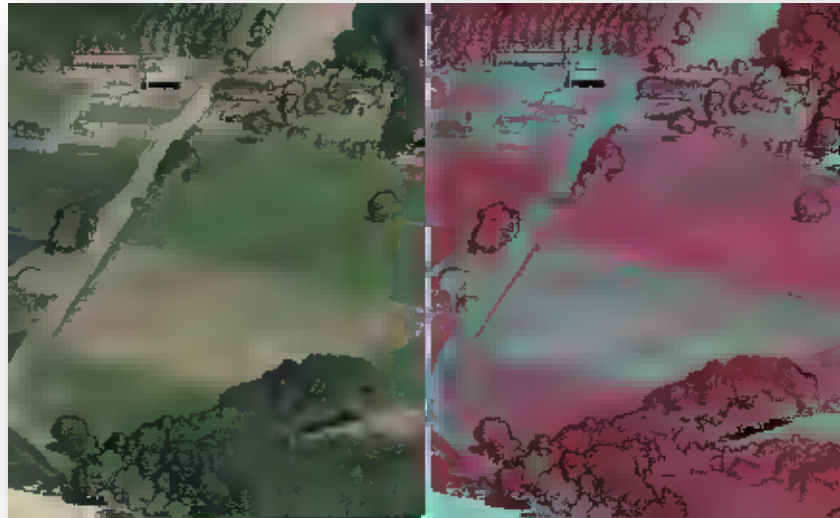


```
011_Pylones  
012_Clochers  
013_Antennes  
014_Eoliennes  
015_Mats_eclairage  
016_Teleski_telesieges_telepheriques  
061_Voies_ferrees_elec  
020_Batiments_BDUni  
030_Lignes_electriques  
041_serres  
061_Voies_ferrees_elec
```



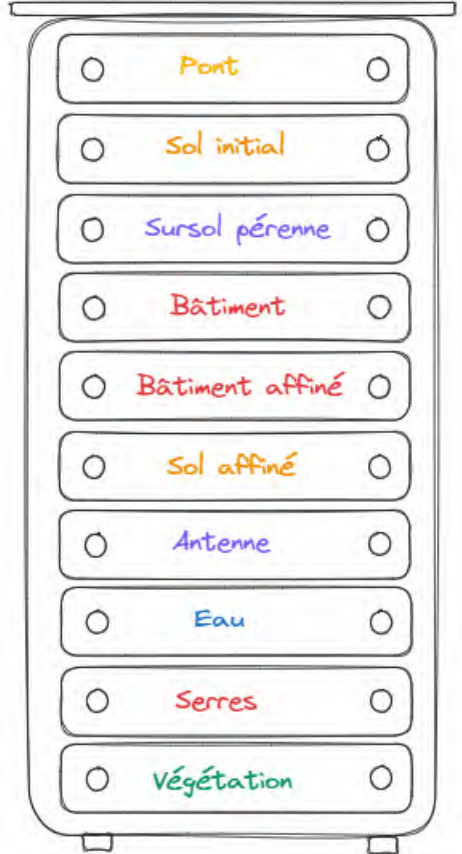
# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

- Des algorithmes de traitement classiques, avec des méthodes déterministes de détection
- **Des données externes :**
  - BD TOPO®
  - BD ORTHO®



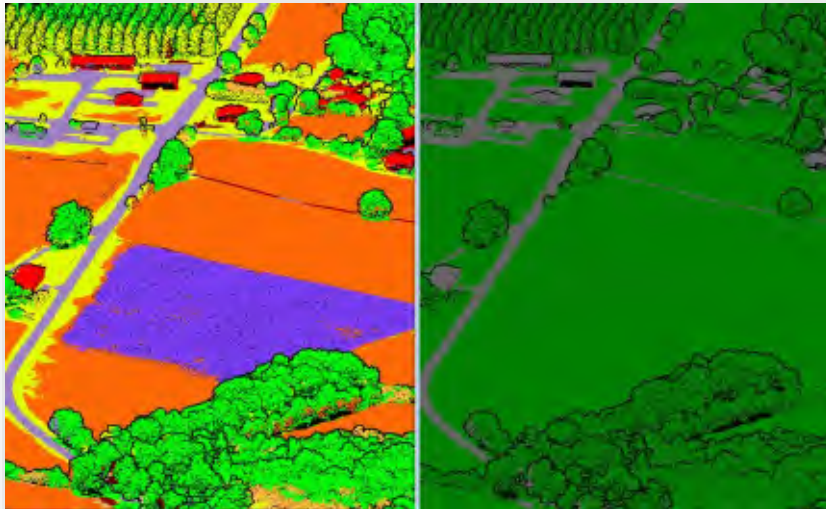
RVB (canaux [0,1,2])

IRC (canaux [3,0,1])



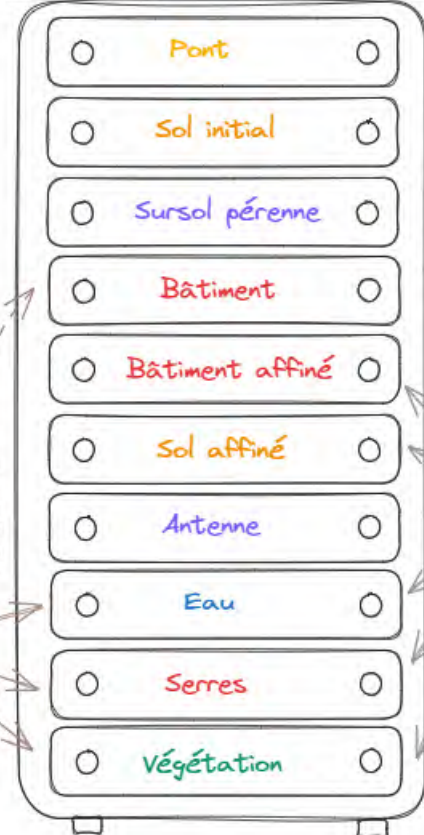
# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

- Des algorithmes de traitement classiques, avec des méthodes déterministes de détection
- **Des données externes :**
  - BD TOPO®, BD ORTHO®
  - Des données issues de la **carte de chaleur IA de l'OCSGE (Prédictions IA ODEON)**, - dont l'indice de végétation – permettant une amélioration du passage à l'échelle



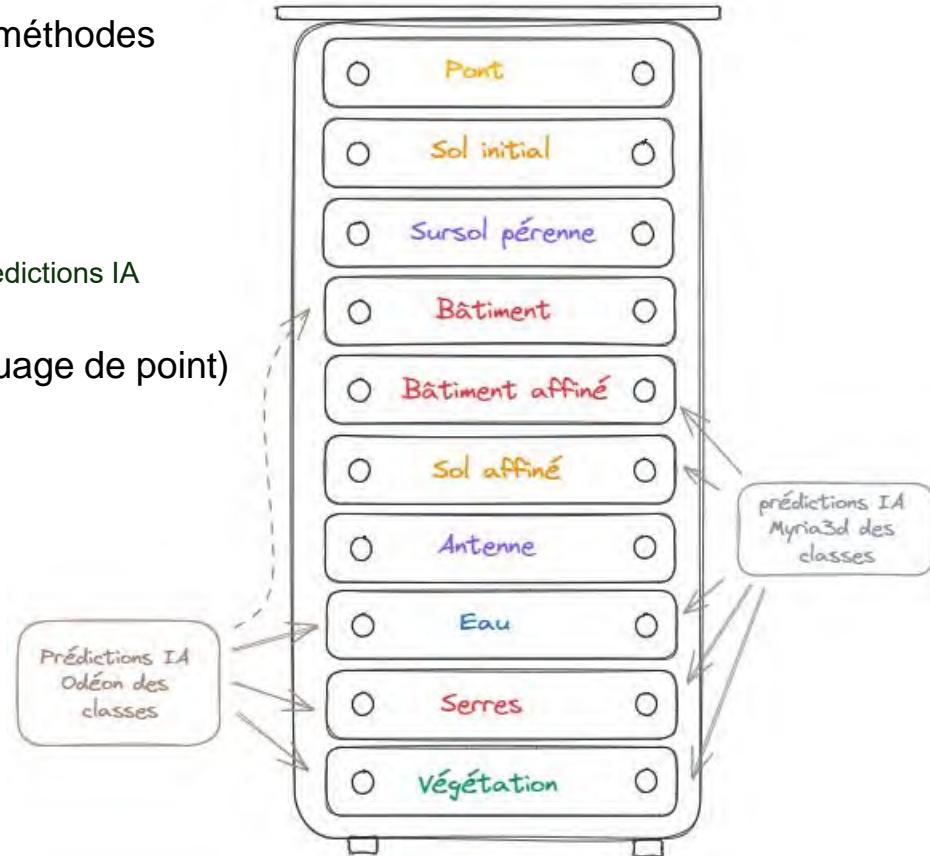
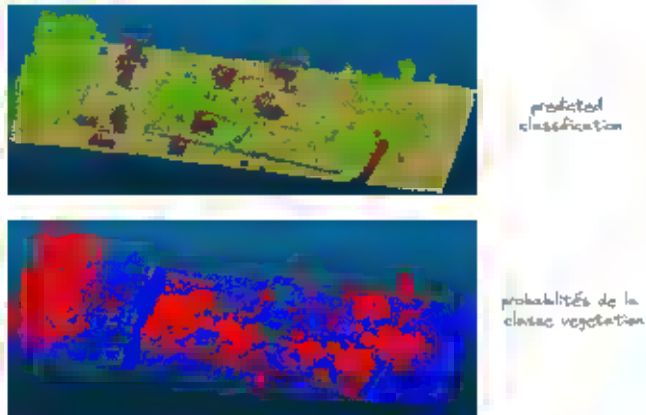
- 1 batiment
- 2 zone\_permeable
- 3 zone\_impermeable
- 4 piscine
- 5 sol\_nu
- 6 surface\_eau
- 7 neige
- 8 coniferes
- 9 coupe
- 10 feuillus
- 11 mixte
- 12 ligneux
- 13 broussaille
- 14 vigne
- 15 pelouse
- 16 culture
- 17 terre\_labouree
- 18 serre
- 19 inconnu

Prédictions IA  
Odéon des  
classes



# Un processus de classification hybride : l'IA en appui

- Des algorithmes de traitement classiques, avec des méthodes déterministes de détection
- Des données externes :
  - BD TOPO®, BD ORTHO®
  - Des données issues de la carte de chaleur IA de l'OCSGE (Prédictions IA ODEON)
- Des méthodes probabilistes (**prédictions IA** sur le nuage de point) pour améliorer ou conforter certaines classes



# Le modèle Myria 3D de classification IA 3D

## Donnée

### Jeu de données multiclassées Lidar HD

- 151 km<sup>2</sup>, sur 3 départements
- Colorisation: RVB+IR
- 7 classes
- Processus automatique + Correction
- Bonne qualité (quelques erreurs + bruit)
- Train/Val/Test: 130/10/10 km<sup>2</sup>

Juin 2022

## Architecture du modèle

### RandLa-Net

- Similaire à PointNet++
- Réécriture pour gérer des nuages de taille arbitraire
- Validé par une communauté open-source (Pytorch-Geometric)
- Accessible (Github)

Octobre 2022

## Code

### Myria3D



- Pytorch & Pytorch-Lighting
- Conçu pour déploiement en environnement docker
- **Open Source:**  
<https://github.com/IGNF/myria3d>

En continu

→ Architecture du système conçue pour des mises à jour régulières

→ Travail de choix des architectures de réseaux de neurones qui a bénéficié de la proximité **d'équipes de recherche très actives sur la classification 3D par deep learning**

→ amélioration continue du modèle

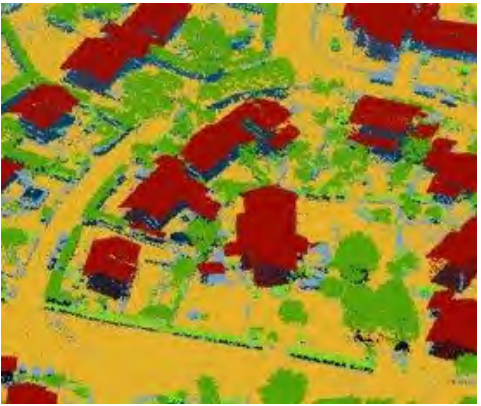
→ Publication du modèle pour les utilisateurs de Lidar HD (Github).

# Evaluation de la performance du modèle IA 3D

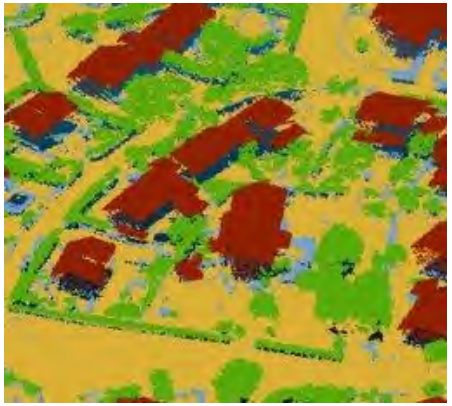
		Unclassified	Ground	Vegetation	Building	Classes rares		
						Water	Bridge	Antennas+Others
TRAIN	Proportion (% of pts.)	7.7%	46.3%	43.6%	2.1%	0.2%	0.03%	0.07%
VAL	Proportion (% of pts.)	8.4%	40.1%	48.8%	2.6%	0.00%	0.01%	0.04%
TEST	Proportion (% of pts.)	9.9%	50.6%	38.9%	0.6%	0.03%	0.01%	0.01%
	Class IoU	<b>35%*</b>	<b>87%</b>	<b>98%</b>	<b>93%</b>	<b>18%</b>	<b>17%</b>	<b>58%</b>
	Mean IoU	<b>57.8%</b>						

→ Bonnes performances sur les classes *Bâtiment*, *végétation*, *Sol* (mIoU= 93%)

*True labels*



*Predicted labels*



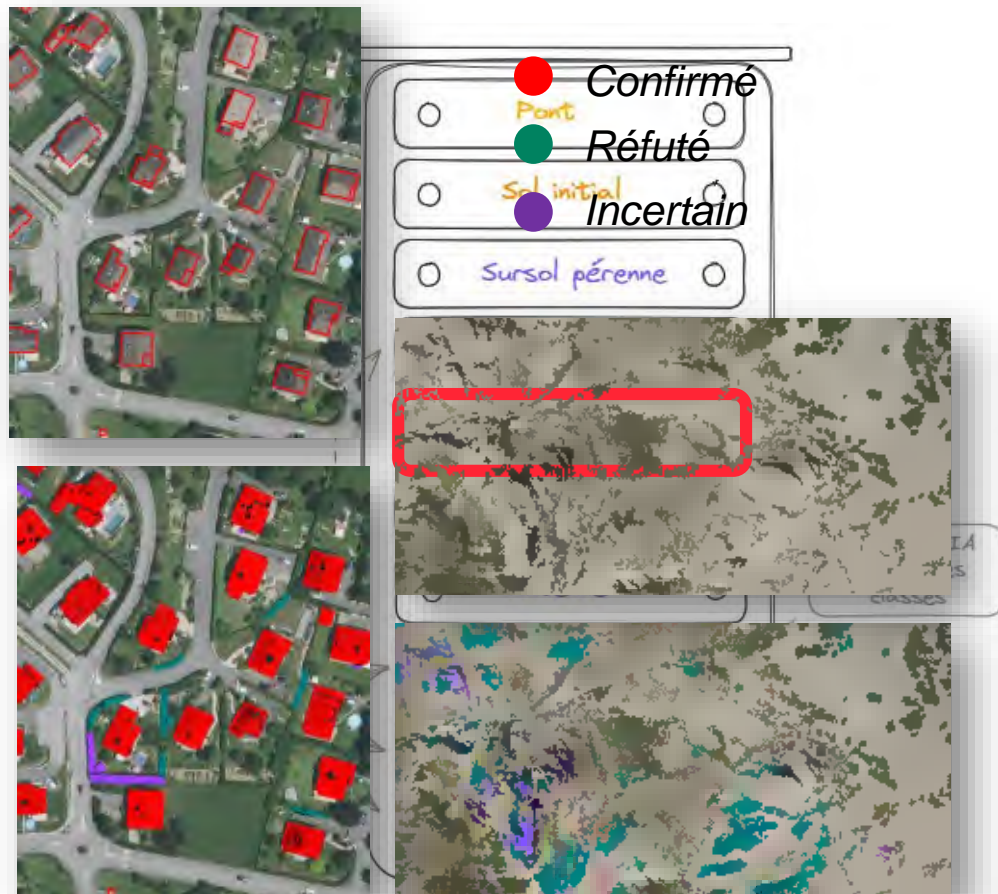
# Bâti affiné par IA

## C'est quoi?

- Fiabilisation des bâtis (en vue d'une reprise manuelle)

## Comment on fait?

- On distingue les bâtiments en 3 classes : bâti, réfuté, incertain.
- On croise la détection sur critères géométriques, les emprises BD TOPO et **les prédictions du modèle IA 3D** (Myria3D)

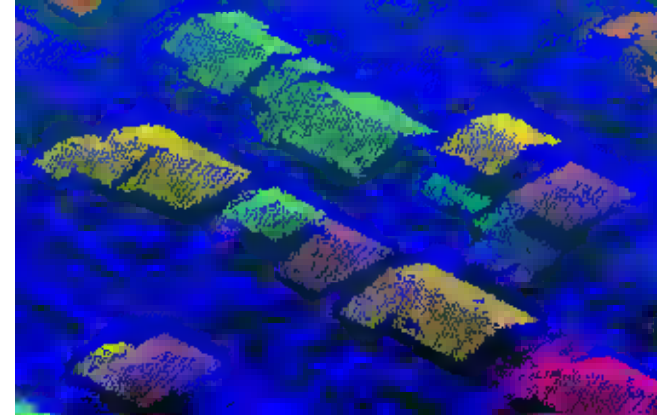


*Sur-classification des bâtiments (haies, végétaux denses réguliers, rochers, camions...)*

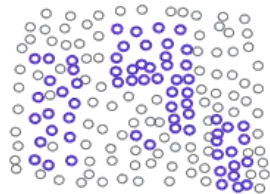


# Principe de fonctionnement de l'IA bâti

- Regroupement des points candidats bâtis par composantes connexes.
- Décision pour chaque groupe de points.
- Propagation aux points.

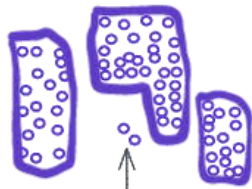


Classification MTS



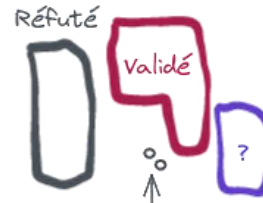
- Point candidat bâti
- Autres points

Composantes connexes

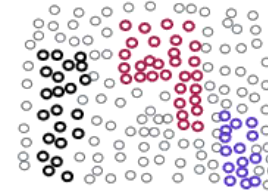


Points candidats bâti trop isolés pour générer un groupe

Décision



Propagation



- Point bâti confirmé
- Point bâti réfuté
- Point candidat bâti restant
- Autres points

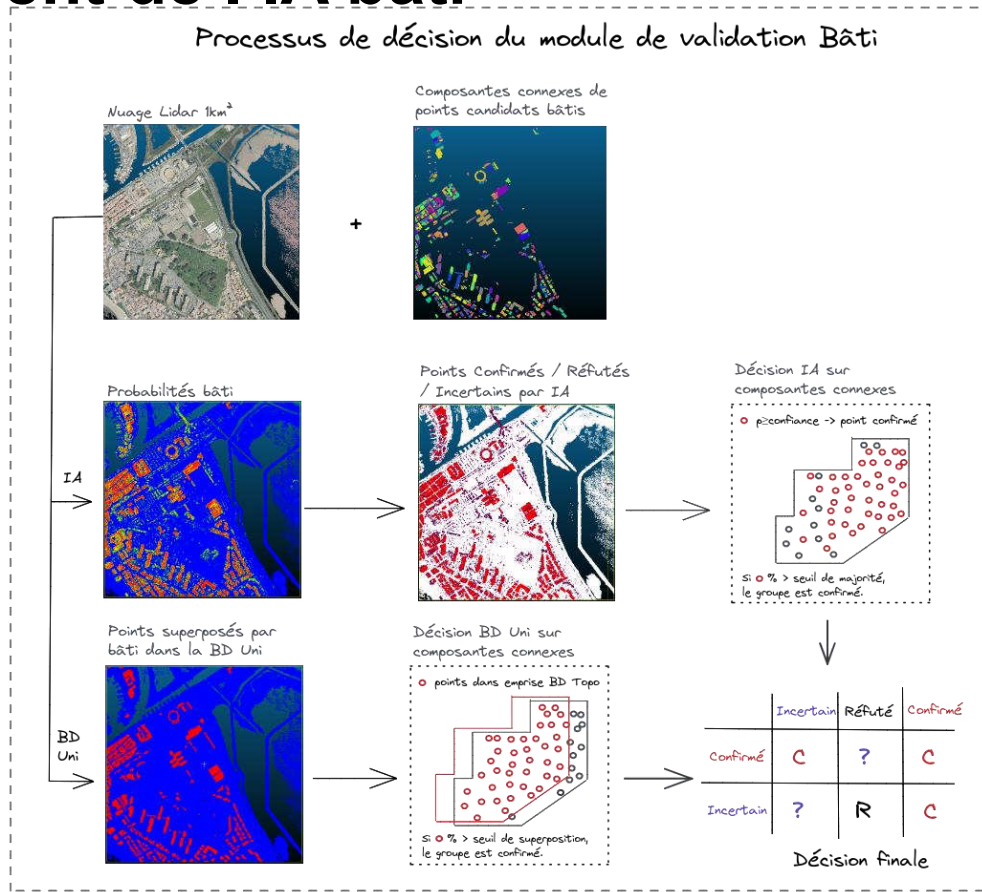
# Principe de fonctionnement de l'IA bâti

Décisions s'appuyant sur **deux sources de vérité**:

- Nuage de points traité par l'IA produisant des probabilités d'être du bâti
- Les emprises de la BD TOPO
- > Prise de décision conjointe

Décisions s'appuyant sur des **seuils**:

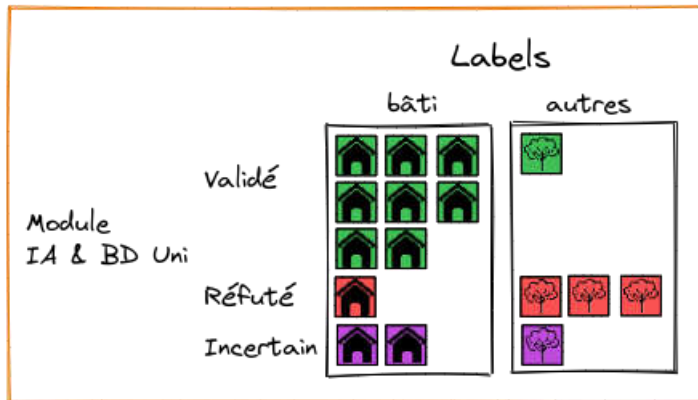
- Seuils de probabilité pour confirmation et réfutation des points
- Seuils de majorité proportionnelle pour confirmation ou réfutation d'un groupe de points via l'IA, confirmation d'un groupe de points via BD Uni.



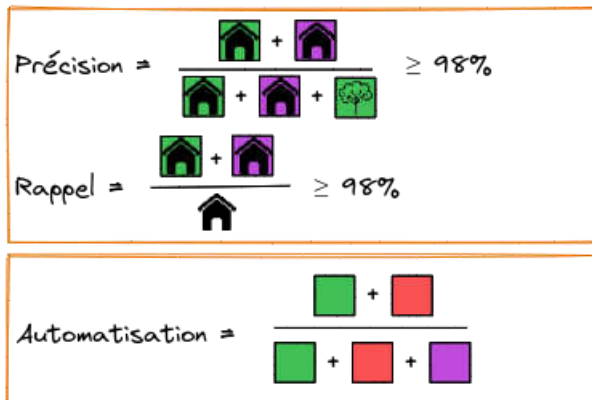
# Principe de fonctionnement de l'IA bâti

Les seuils de décision sont optimisés pour **maximiser l'automatisation**, sous contrainte.

## Décisions et erreurs



## Contraintes et critère à maximiser



**Synergie** des 2 sources de données du fait de l'**optimisation conjointe**:

- L'IA compense les manques de la BD TOPO.
- La BD TOPO rattrape les réfutations à tort du modèle IA. → Possibilité de moindre exigence IA en réfutation permettant d'augmenter le taux d'automatisation sans perte de qualité.

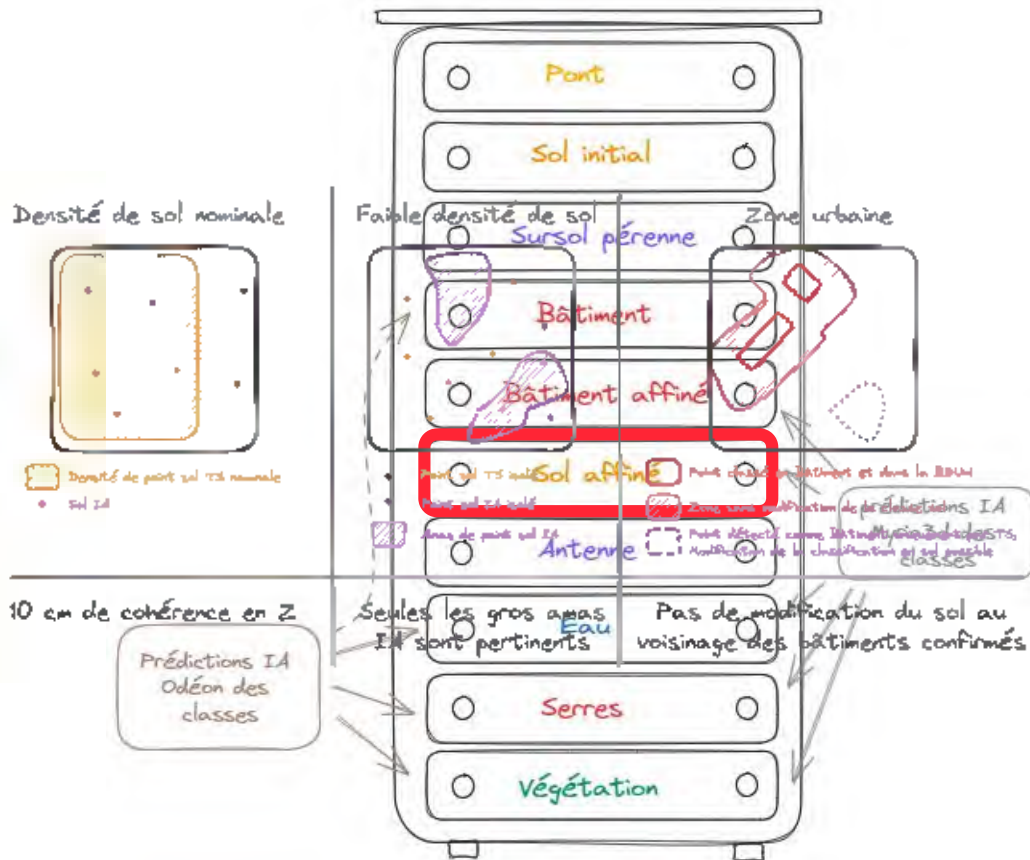
# Sol affiné par IA

## C'est quoi?

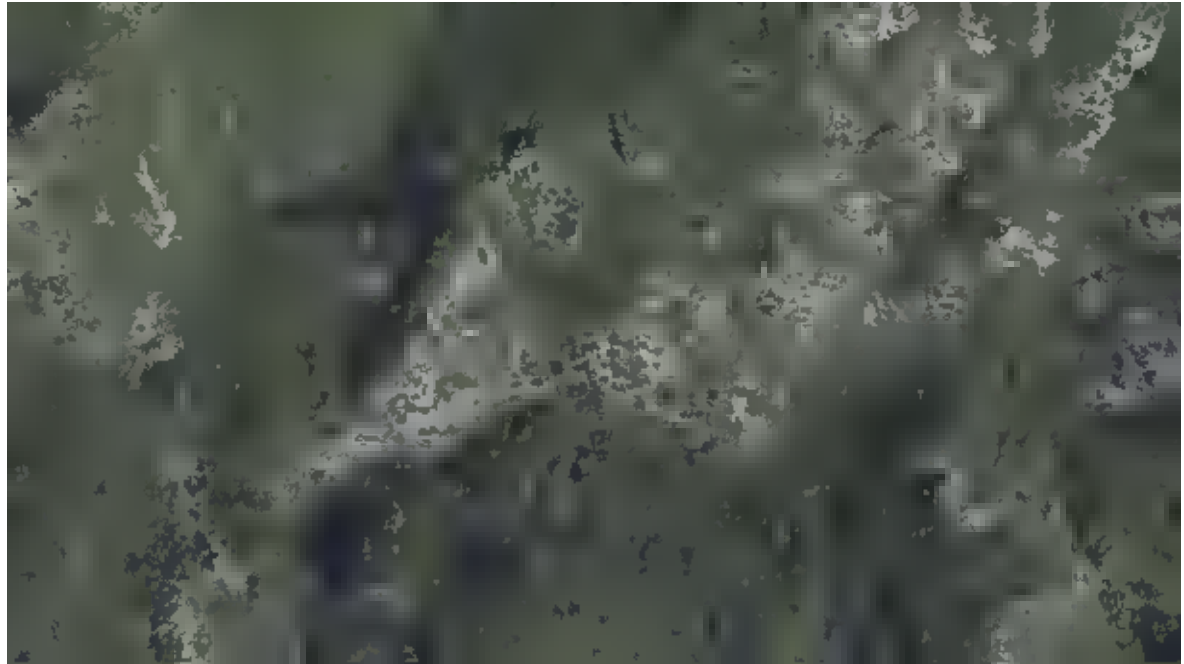
Ø Une récupération des points sol obtenus par prediction IA là où la detection sur critères géométriques ne donne pas satisfaction (zones de fortes pentes notamment)

## Comment on fait?

Ø En dehors des zones bâties, passage en sol des amas de points sol identifiés par l'IA

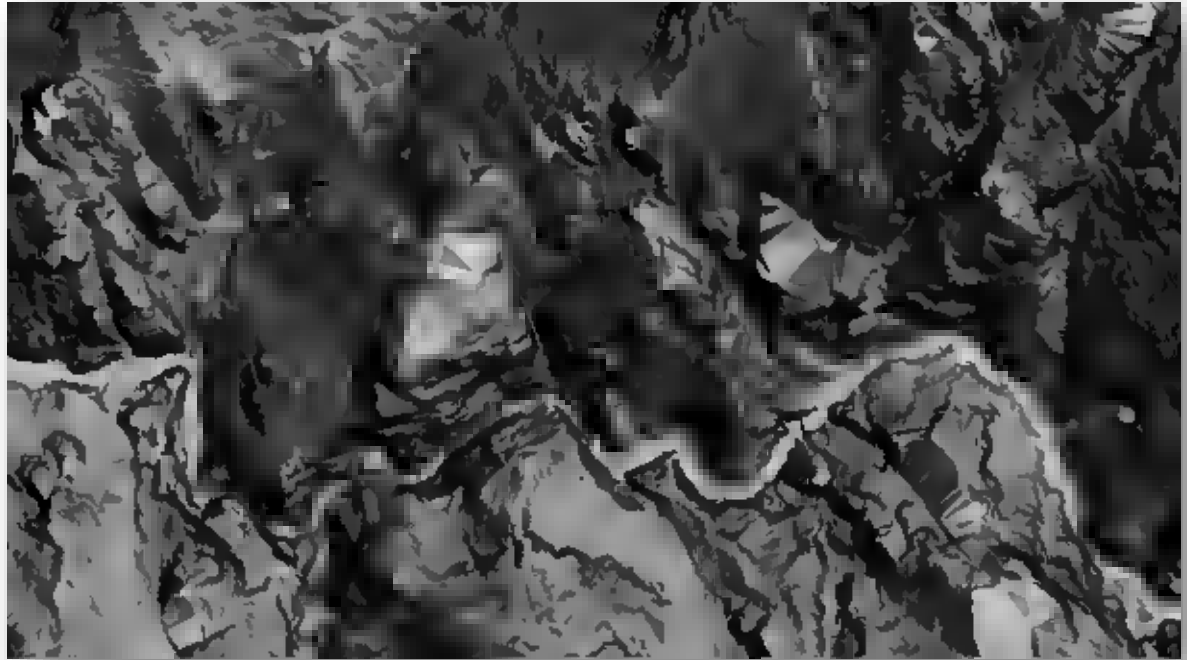


# Sol affiné par IA



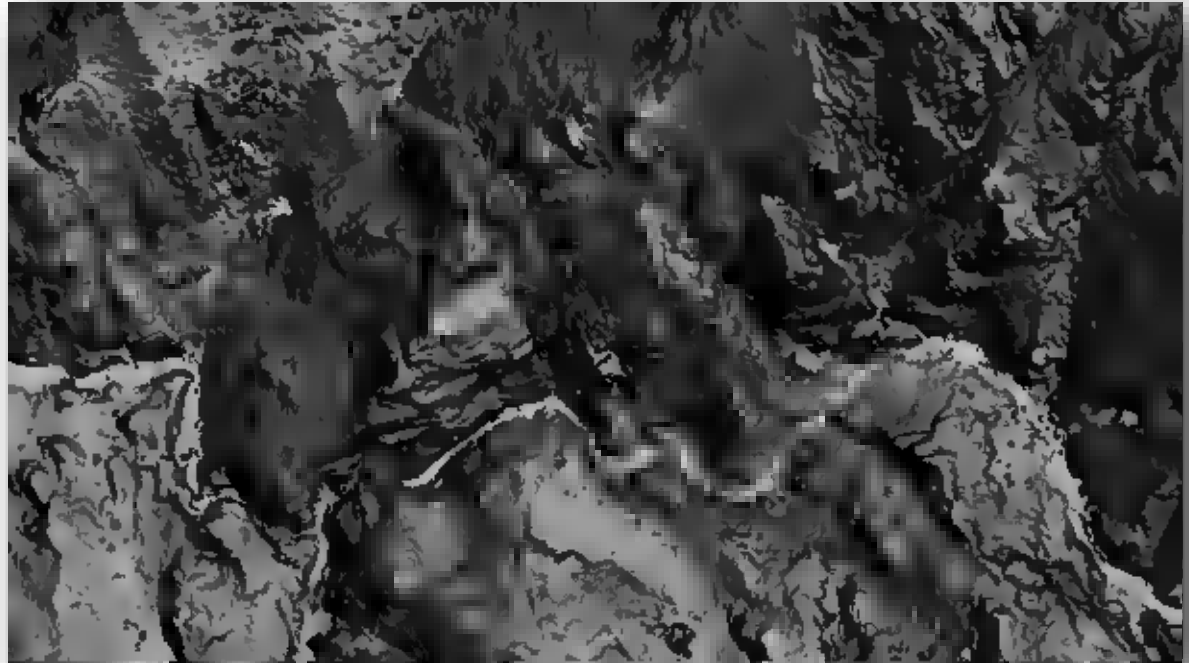
# Sol affiné par IA

Méthode classique  
seule



# Sol affiné par IA

IA seule



# Sol affiné par IA

Hybridation des traitements:  
Classique + IA





# Végétation

## C'est quoi?

Ø De la végétation basse jusqu'aux arbres (inclu les champs)

Ø Découpage en 3 strates de végétation :

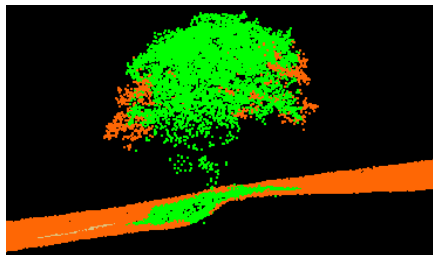
- Inférieur à 50 cm
- 50 cm – 1,5 m
- Supérieur à 1.5 m.

## Comment on fait?

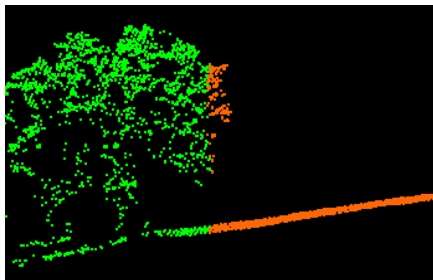
Ø Prédiction occupation du sol

Ø Grouping géométrique

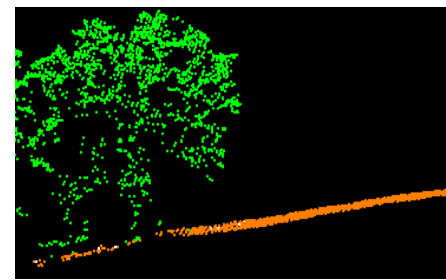
Ø Prédiction IA 3D Myria3D (zones d'ombre)



Prédiction occupation  
du sol

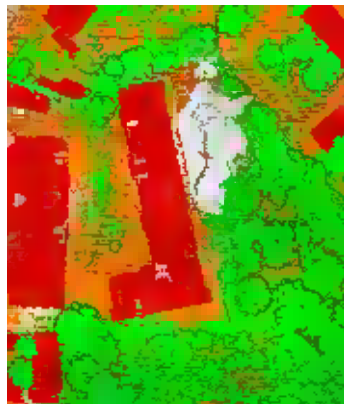


Avec le grouping

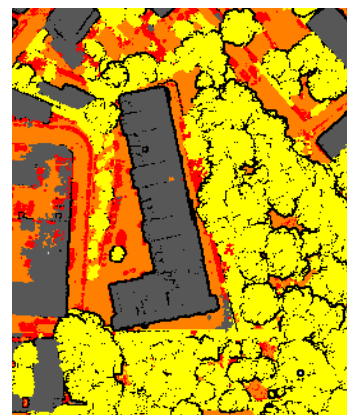


# Végétation

Rattrapage des défauts des prédictions par l'occupation du sol grâce aux prédictions IA 3D dans les zones d'ombres

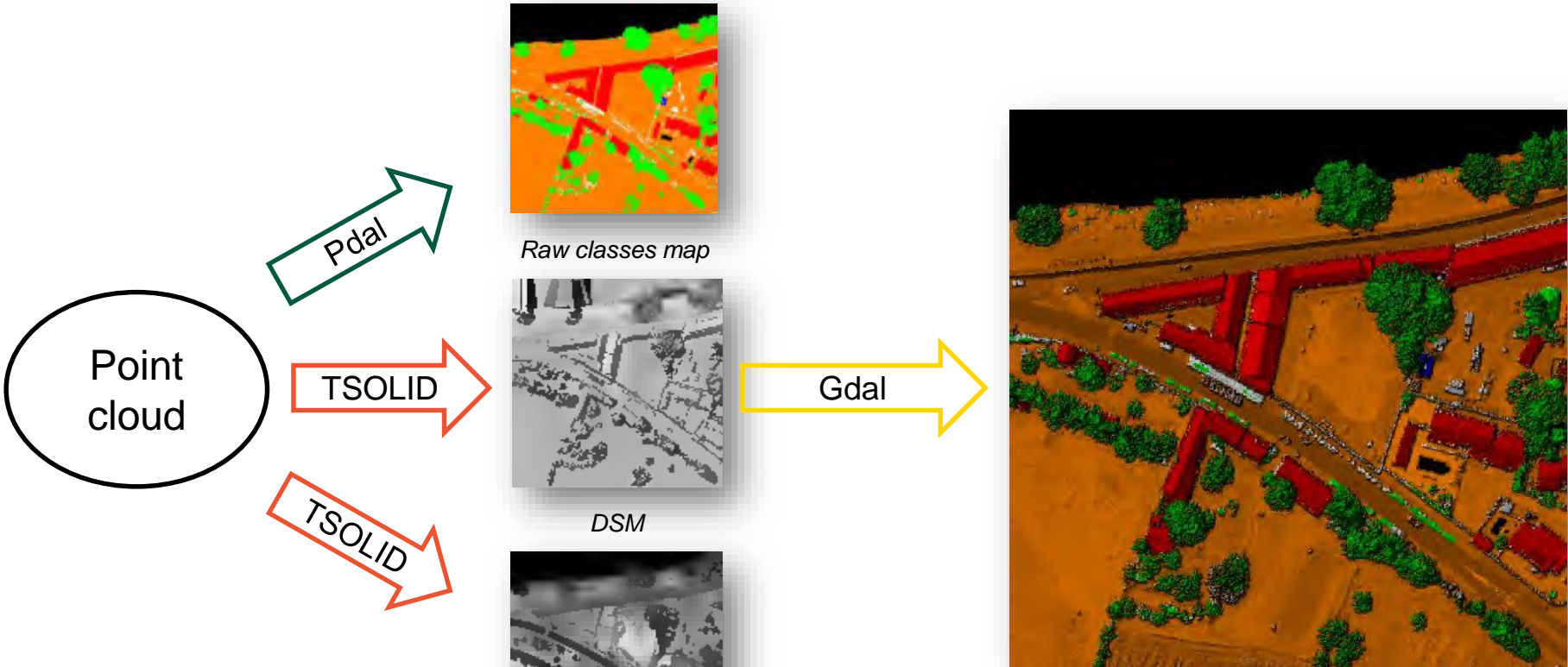


Occupation du sol



IA 3D

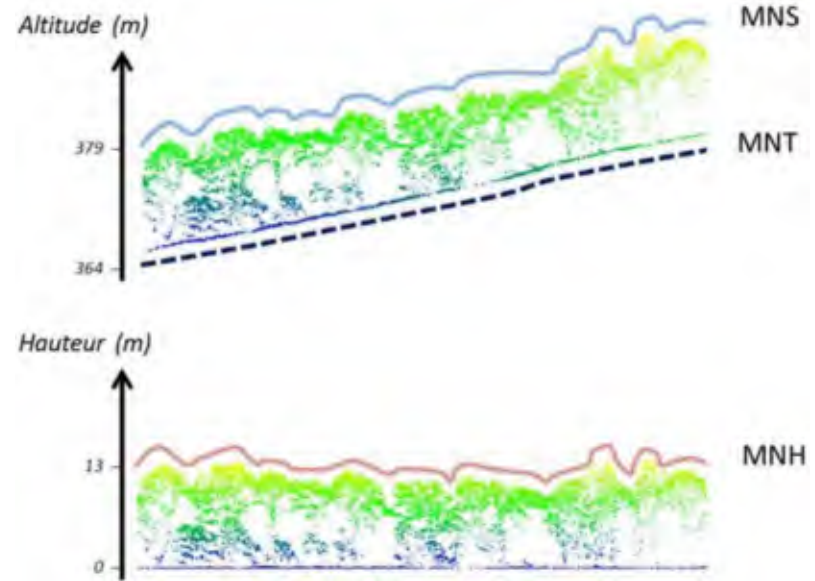
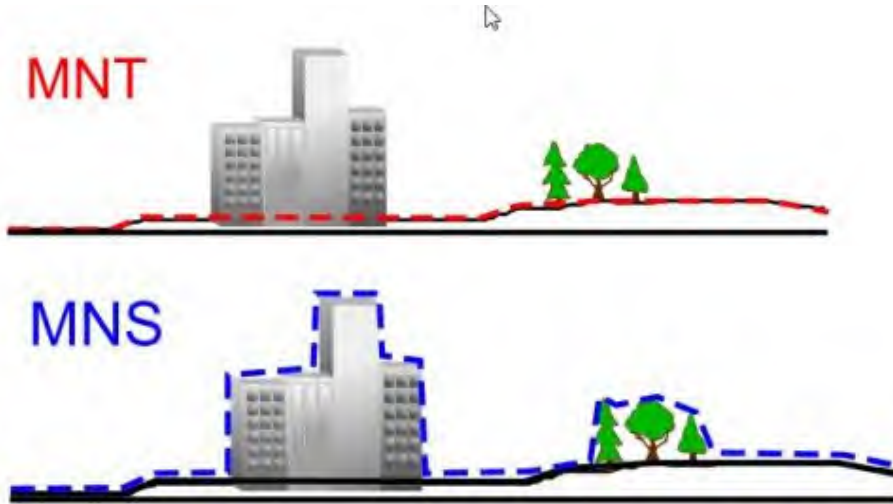
# Contrôle de la classification



# Le calcul des modèles numériques

## Produits dérivés (MNT/MNS/MNH)

- Au pas de **50cm** et 5m
- Au format GeoTIFF

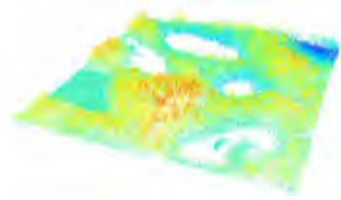


Système géodésique	Ellipsoïde associé	Projection	Système altimétrique	Type d'altitudes
RGF93	IAG GRS 1980	Lambert 93	IGN 1969	Normale

# Comment sont-ils générés ?

## 1) Sélection d'un sous-ensemble de points pour la génération de la triangulation :

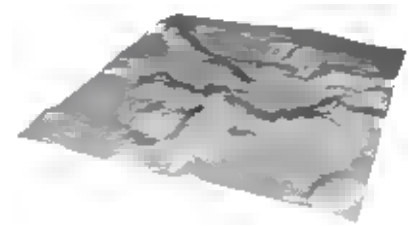
- pour le MNT : les classes de points LIDAR utilisées pour l'interpolation du MNT sont les classes **sol** ;
- Pour le MNS : les classes de points LIDAR utilisées pour l'interpolation du MNS sont les classes **sol, végétation, bâtiment, tabliers de pont** ;



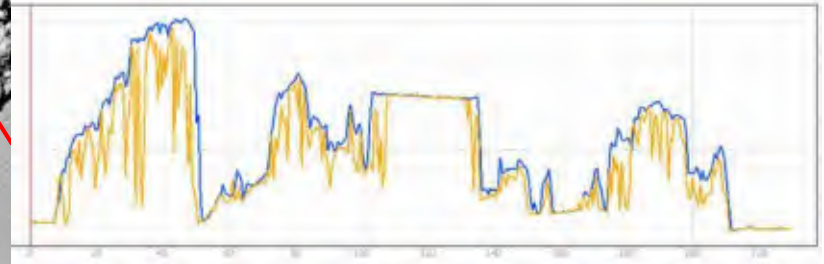
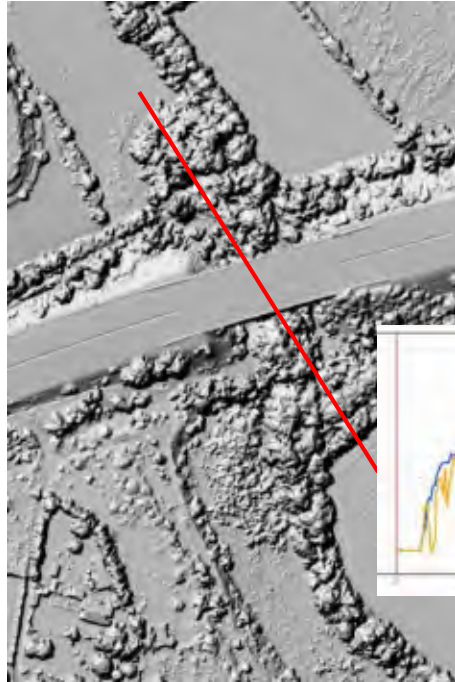
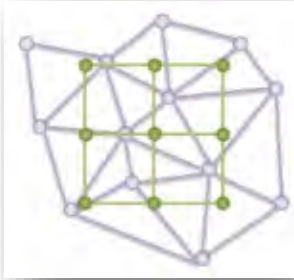
## 2) Génération d'un maillage à l'aide d'une méthode d'interpolation ;



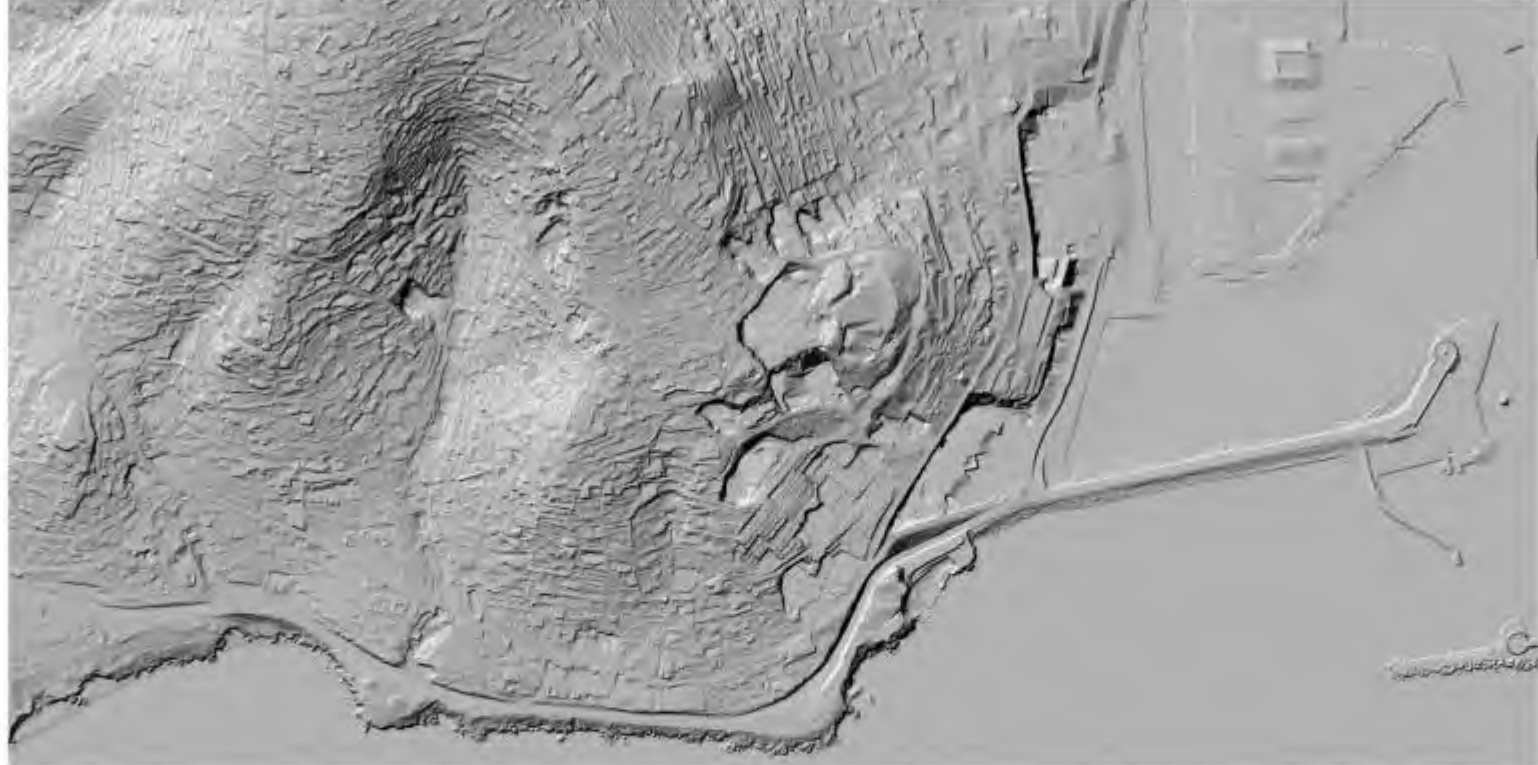
## 3) Rastérisation : passage de l'interpolation à une grille régulière.



# Pourquoi un préfiltrage ?



Profil **MNS V0** / **MNS V1**

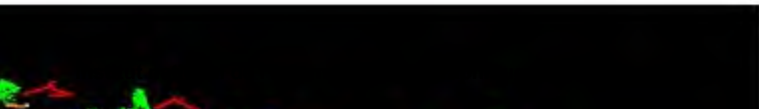


MNT





MNS

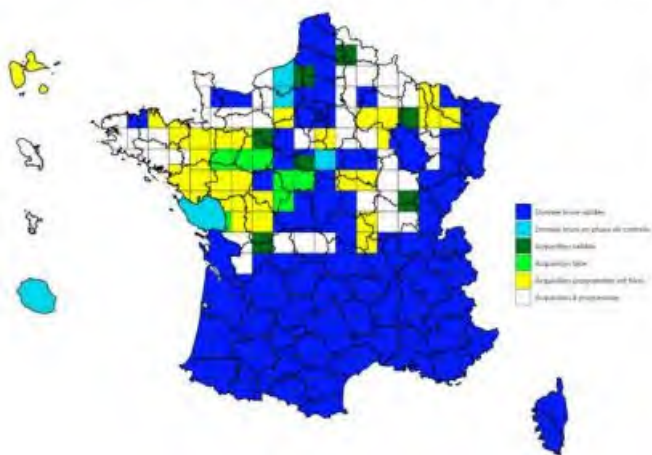




An aerial photograph of a lush, green forested valley. A river flows through the center, with a dam structure visible in the middle ground. The terrain is rugged, with steep slopes and a deep canyon. The text '4. Avancement' is overlaid in white on the left side of the image.

# 4. Avancement

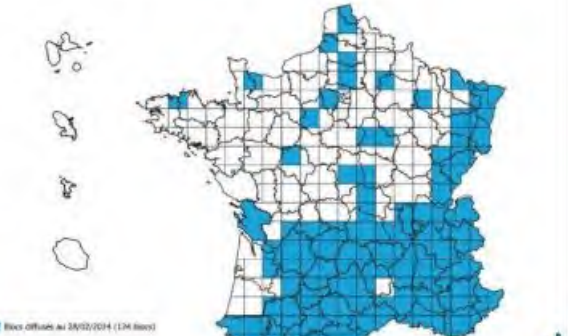
# Avancement acquisitions et traitements (au 28/02/2024)



380 000 km<sup>2</sup> blocs acquis (dont La Réunion)  
 342 000 km<sup>2</sup> bruts validés : 62% métropole  
 Acquisitions hiver 23-24 en cours



304 157 km<sup>2</sup> classés  
 55% de la métropole



288 000 km<sup>2</sup> diffusés  
 52% de la métropole

# Accès aux données

À date,

téléchargement des nuages de points classés

<https://geoservices.ign.fr/lidarhd#telechargementclassifiees>

Par dalle kilométrique (~ 250 Mb / dalle, format LAZ COPC)

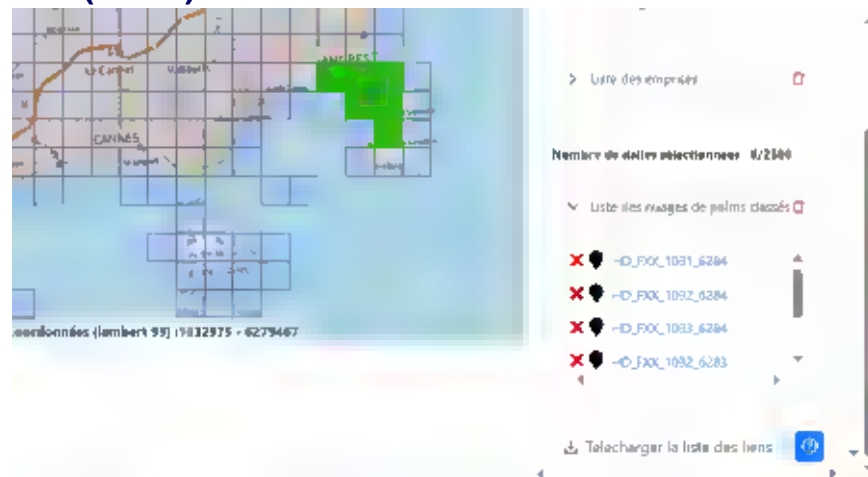
De plus en plus de clients 3D pour charger les données (QGIS)

À venir,

téléchargement des MNX

Diffusion en flux depuis la Géoplateforme

Client 3D web en cours de développement

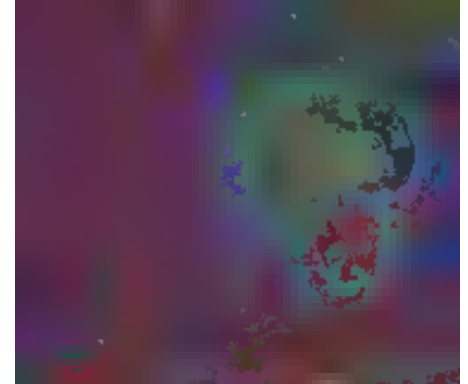
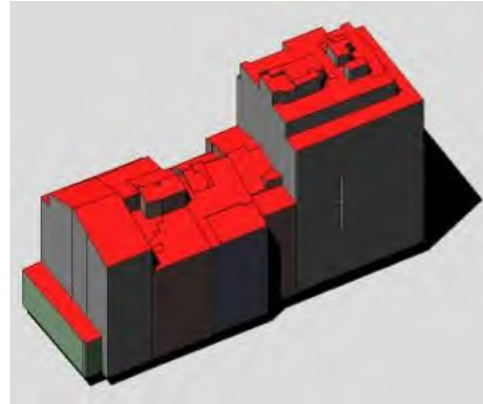
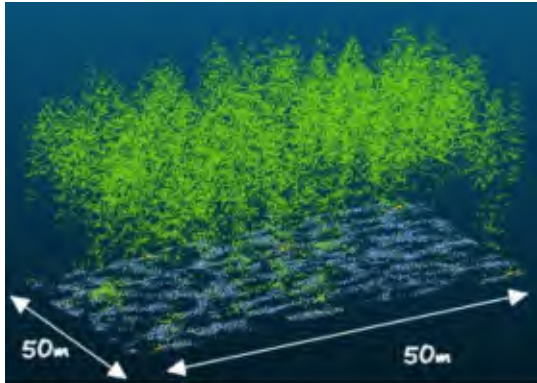


# Perspectives

Terminer le programme (dernières acquisitions en métropole durant les hivers 2024-2025 et 2025-2026)

Définir le processus de mise à jour

Valoriser les données du programme





RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

IGN

INSTITUT NATIONAL  
DE L'INFORMATION  
GÉOGRAPHIQUE  
ET FORESTIÈRE

CHANGER  
D'ÉCHELLE

