



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté de foresterie, de géographie
et de géomatique

Fonds de recherche
sur la nature
et les technologies

Québec



Sécurité publique

Québec



CENTRE DE RECHERCHE

EN DONNÉES ET INTELLIGENCE
GÉOSPATIALES

La modélisation forestière au service de la vision par ordinateur

Les jumeaux numériques et le développement durable

Olivier STOCKER

ATELIERS SUR LES JUMEUX NUMÉRIQUES – 9 MARS 2023

Sommaire



Jumeaux
Numériques
Forestiers



Cas d'application



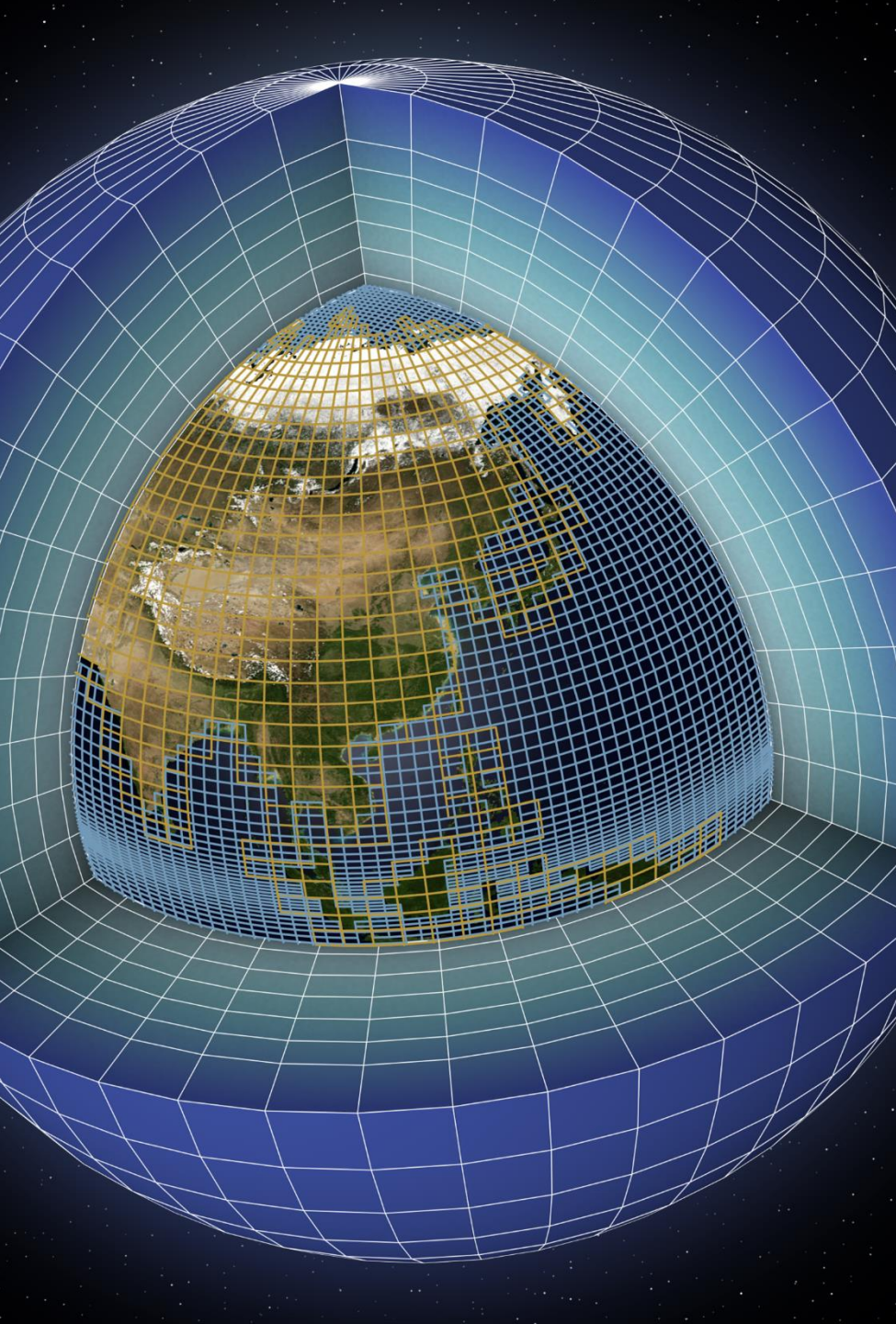
Limites des Modèles
Numériques
Forestiers



Définition

Représentation virtuelle d'entités et/ou de processus réels synchronisée à une fréquence et une fidélité donnée

Réalité = Représentation virtuelle



Les jumeaux numériques environnementaux

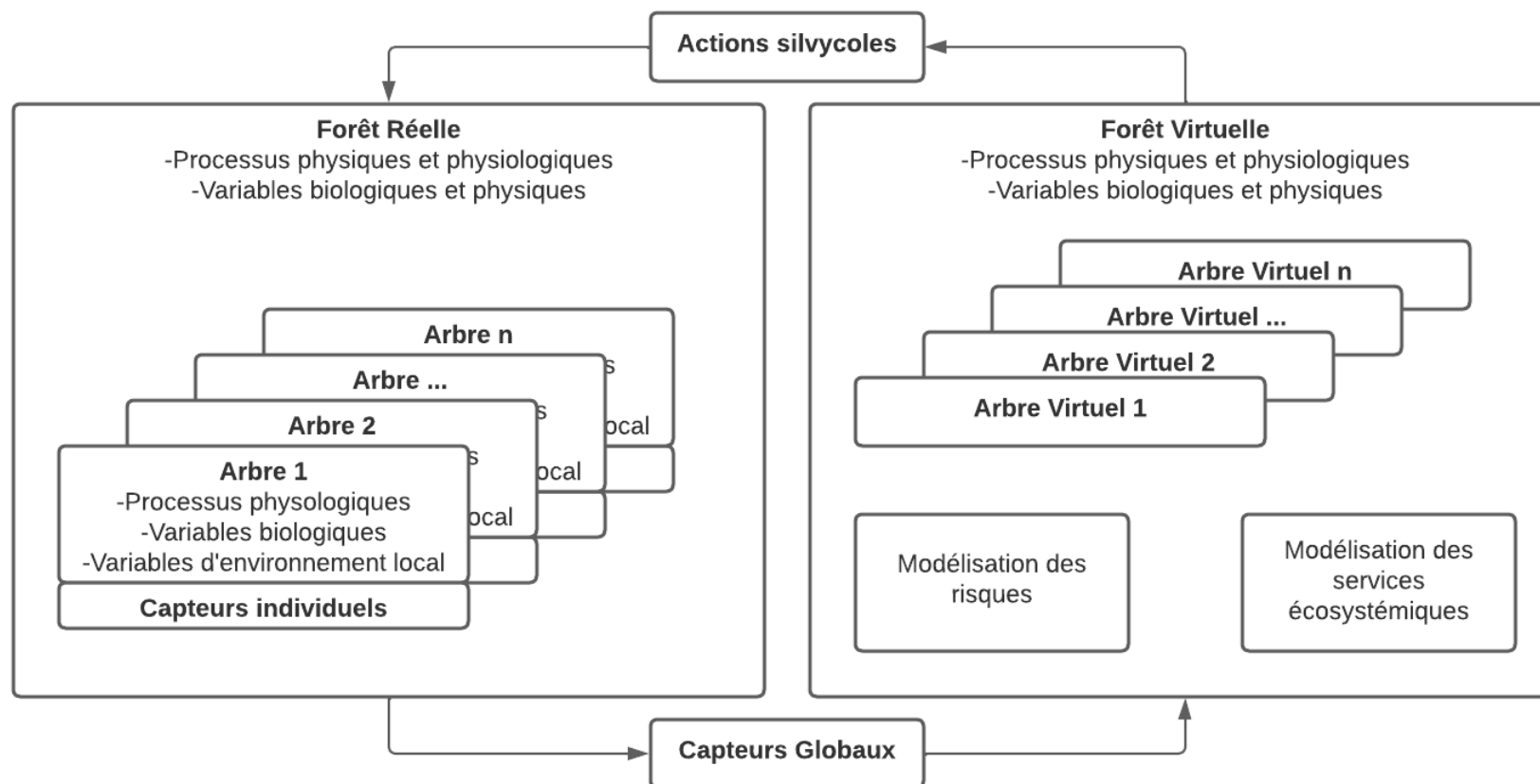
Modèles climatiques :

- Représentation informatique simplificatrice
- Capteurs au sol (station météo)
- Différents modèles pour différents niveaux de détails

**Ancêtre de jumeaux numériques
environnementaux**



Théorisation du Jumeau Numérique Forestier (JNF)



Fréquence de synchronisation : **En temps réel**

Fidélité : **Maximale**



Utilité d'un JNF

Estimation :

- État de santé
- Valeur marchande
- Actions de gestion durable

Modélisation :

- Risques
- Services écosystémiques

Amélioration :

- Compréhension des mécanismes physiques et écophysiologiques
- Méthodes de préservation
- Outils de surveillance et d'acquisition



Etat de l'art actuel pour les JNF

Absence de jumeau numérique forestier

Solution s'en approchant : Modélisation forestière

- RAMI [1]
- 3D Forest [18]
- Pytreedb [11]
- VirtSilv [17]



Etat de l'art actuel pour les JNF

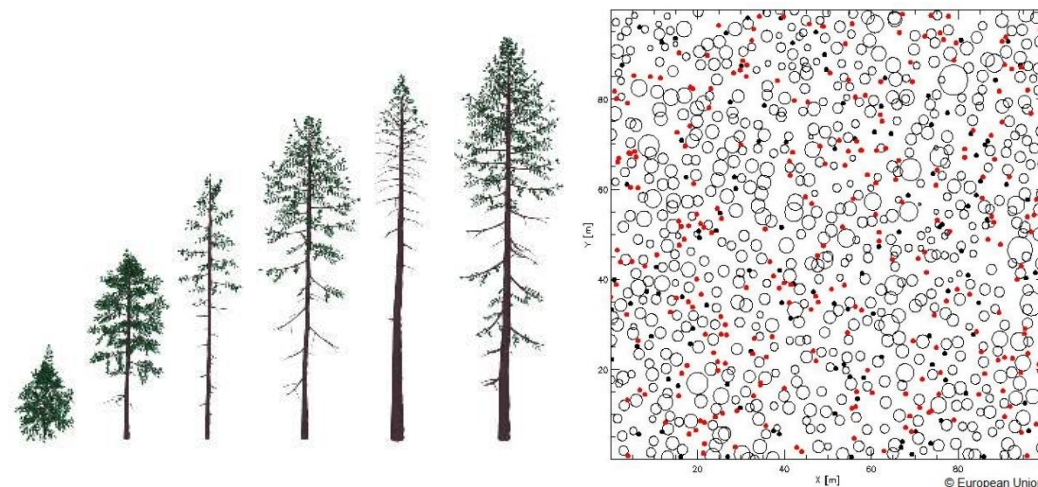
Expérience RAMI IV & V [1]:

- 6 scènes de forêts réelles
- Modélisation des arbres selon leur caractéristiques
- Positionnement exact des arbres vivants
- Modélisation des attributs spectraux



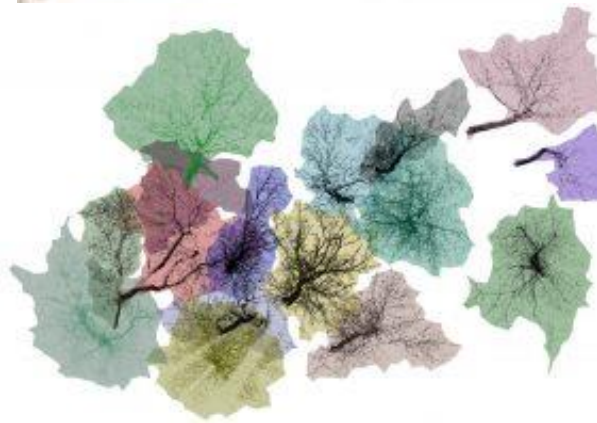
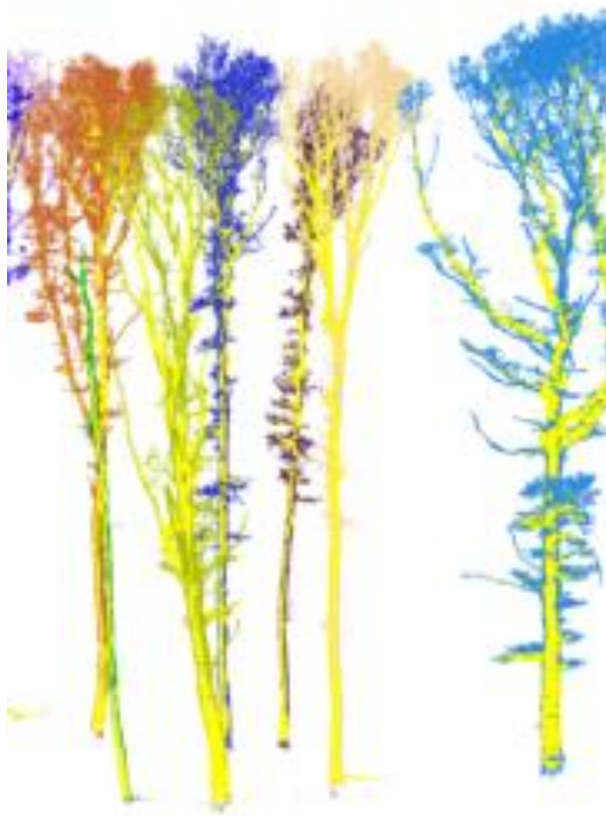
Objectifs :

- Validation de modèles de transfert radiatifs





Etat de l'art actuel pour les JNF



3D Forest [18]:

- Extraction d'arbres individuels
- **Modélisation QSM** d'arbres
- **Détection** automatique des **informations structurelles** des arbres

Objectifs :

- Calculs de volumes de **bois marchand**
- Extraction de **variables écologiques**



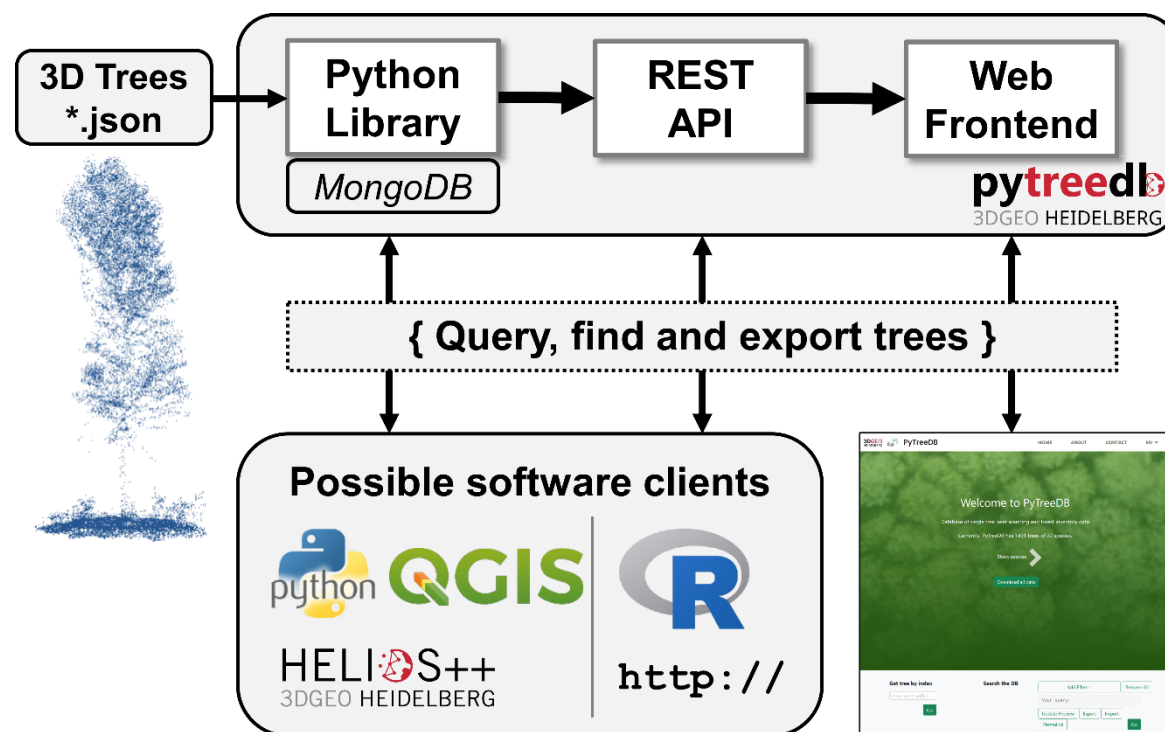
Etat de l'art actuel pour les JNF

Pytreedb [11]:

- Base de données de scans LiDAR terrestres d'arbres individuels
- Stockage des informations structurelles des arbres
- Positions

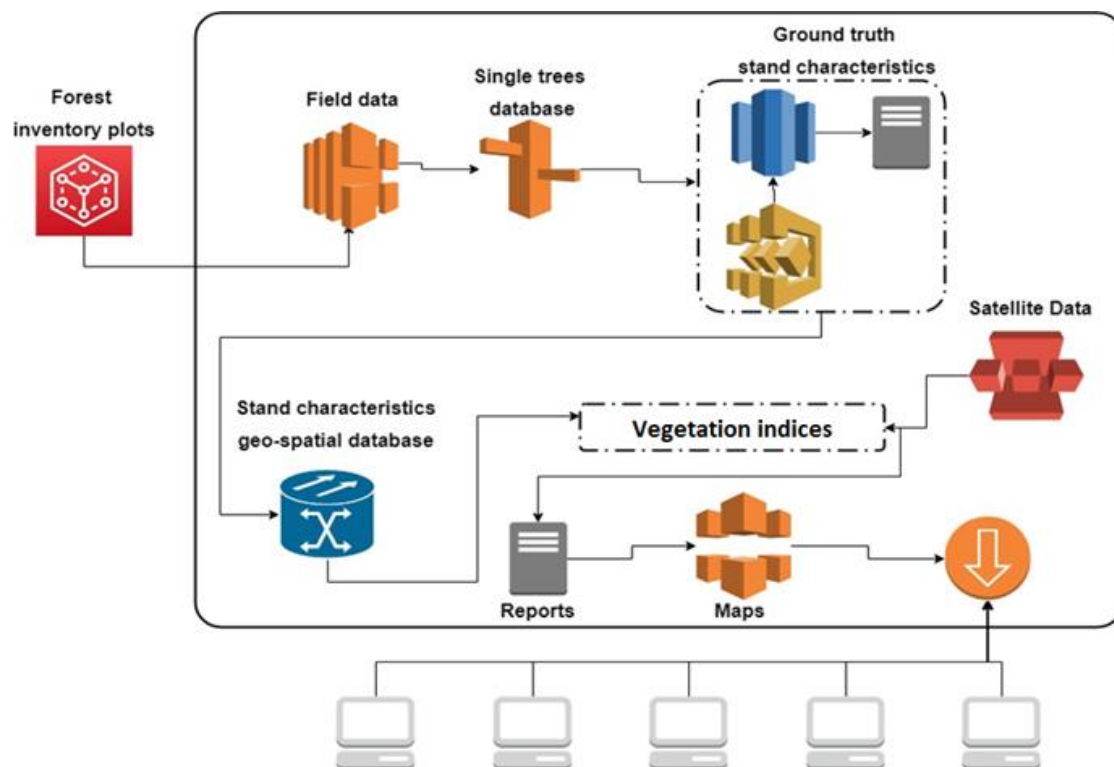
Objectifs :

- Mise à disposition de données d'arbres individuels pour simulations et modélisations de forêts





Etat de l'art actuel pour les JNF



VirtSilv [17]:

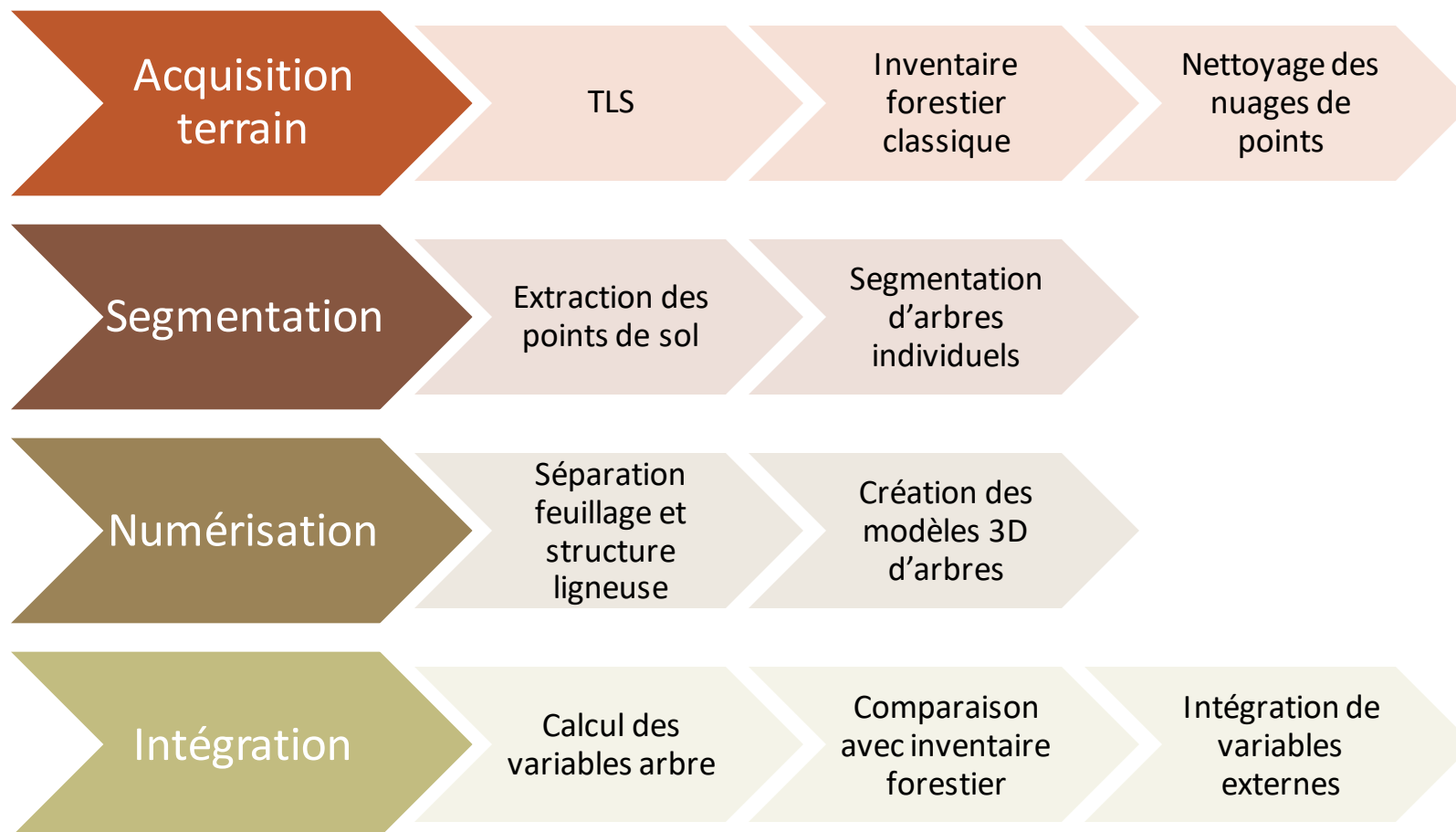
- Base de données de scans LiDAR terrestres
- Informations structurelles et écophysologiques
- Positionnement exact des arbres
- Visualisations 3D

Objectifs :

- Modèle numérique forestier complet
- Extraction de cartes pour les aménageurs



Création d'un Modèle Numérique Forestier





Modèle
Numérique
Forestier pour la
vision par
ordinateur :
Cas d'application



Utilité d'un JNF

Estimation :

- État de santé
- Valeur marchande
- Actions de gestion durable

Modélisation :

- Risques
- Services écosystémiques

Amélioration :

- Compréhension des mécanismes physiques et écophysiologiques
- Méthodes de préservation
- Outils de surveillance et d'acquisition



Utilité d'un JNF

Estimation :

- État de santé
- Valeur marchande
- Actions de gestion durable

Modélisation :

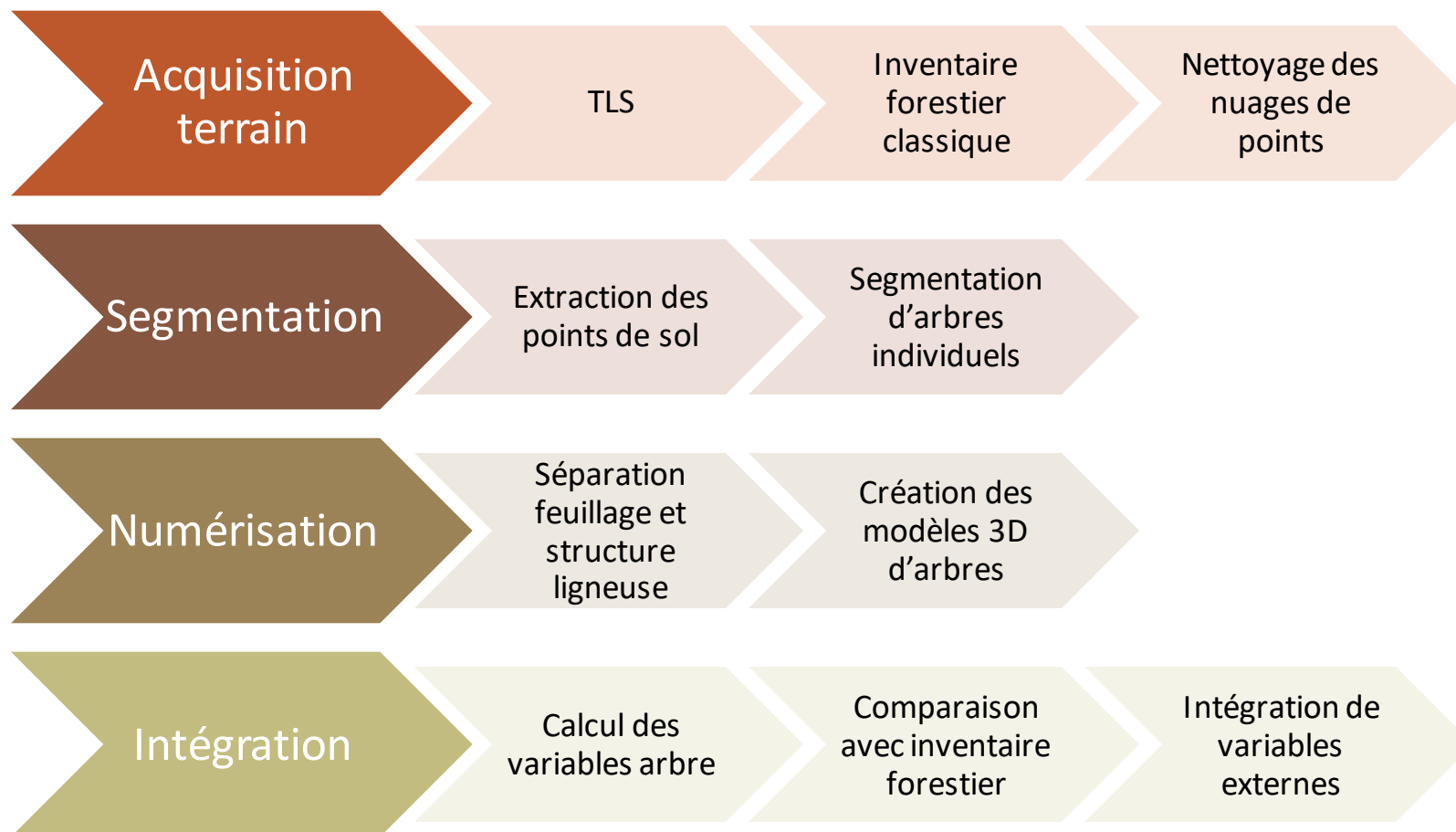
- Risques
- Services écosystémiques

Amélioration :

- Compréhension des mécanismes physiques et écophysiologiques
- Méthodes de préservation
- **Outils de surveillance et d'acquisition**

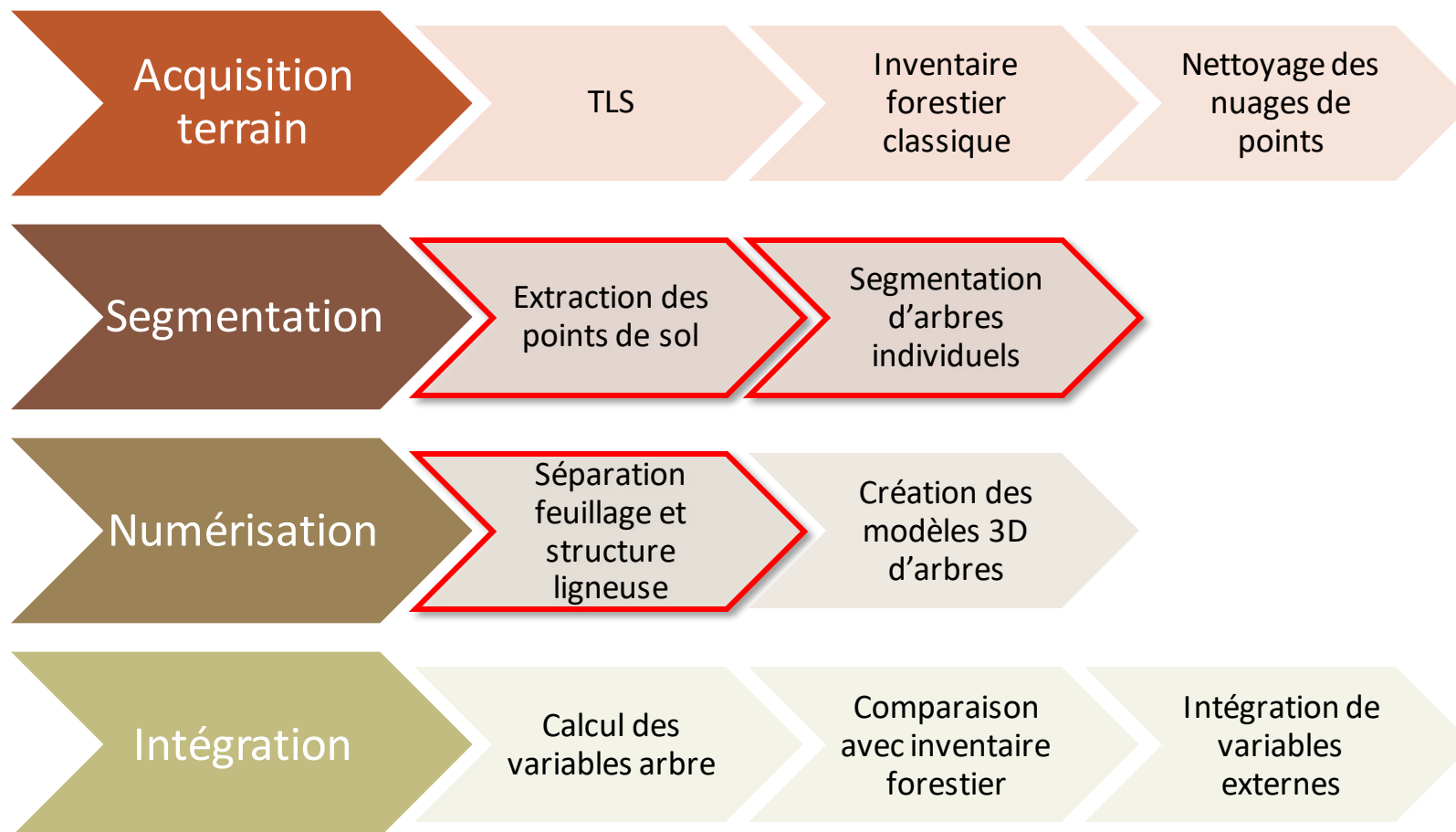


Création d'un Modèle Numérique Forestier



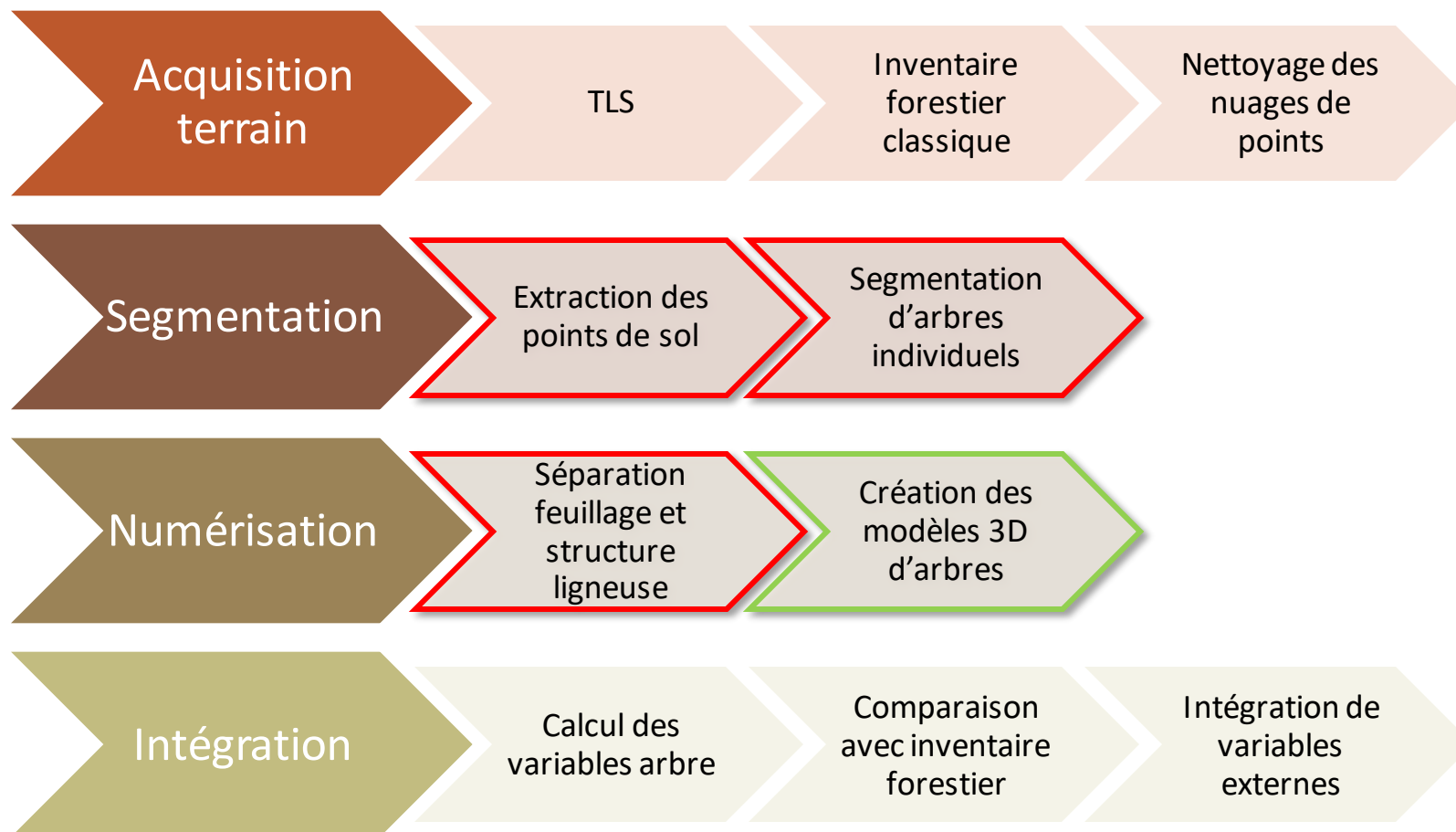


Création d'un Modèle Numérique Forestier





Création d'un Modèle Numérique Forestier

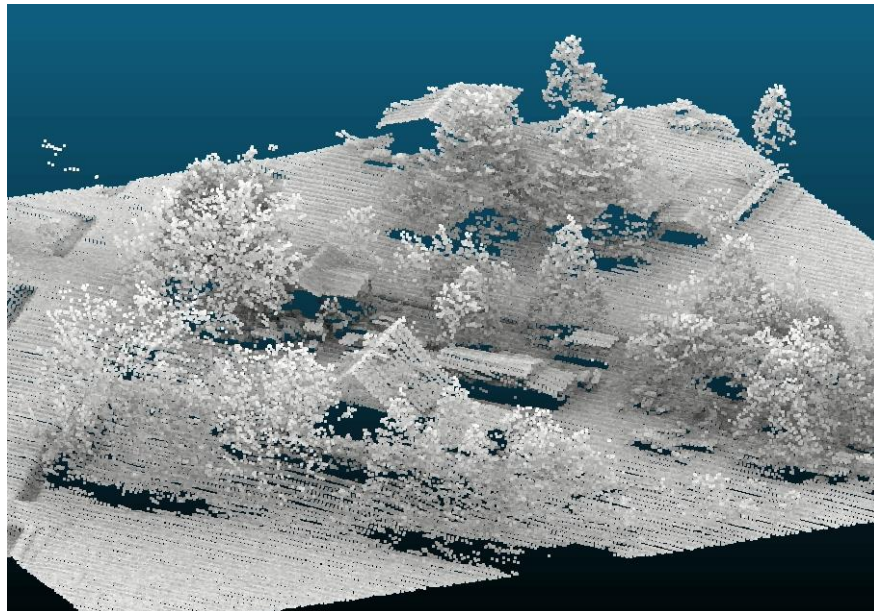




Besoin d'automatisation

Nuage de points LiDAR :

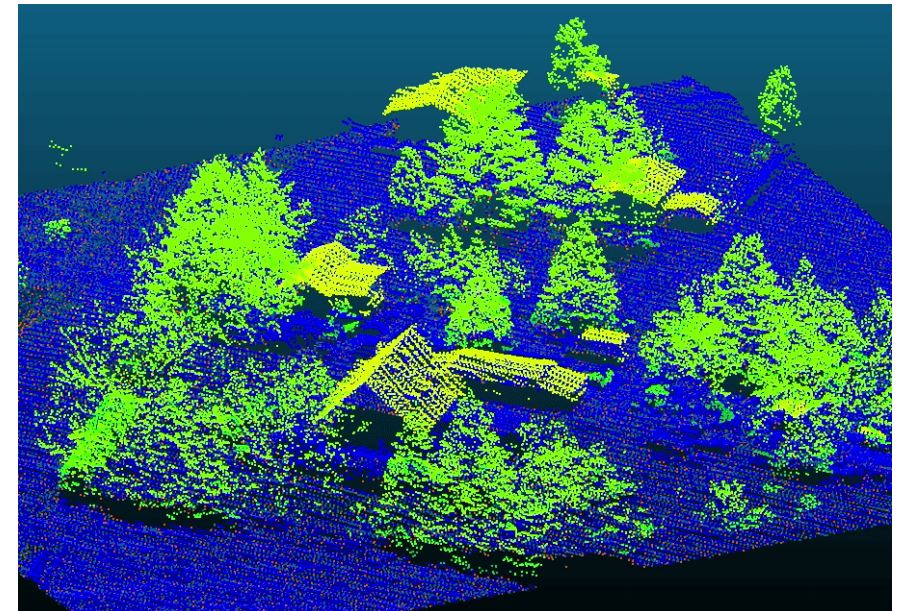
- Informations géométriques des *surfaces*
- Informatiquement *lourd*
- Non sémantisé



Sémantisation

Sémantisation :

- Difficulté de compréhension et de sélection
- Grande quantité de données

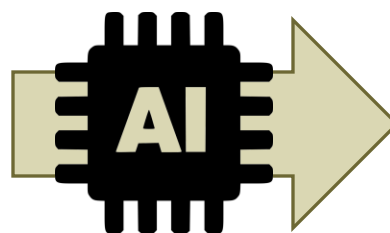
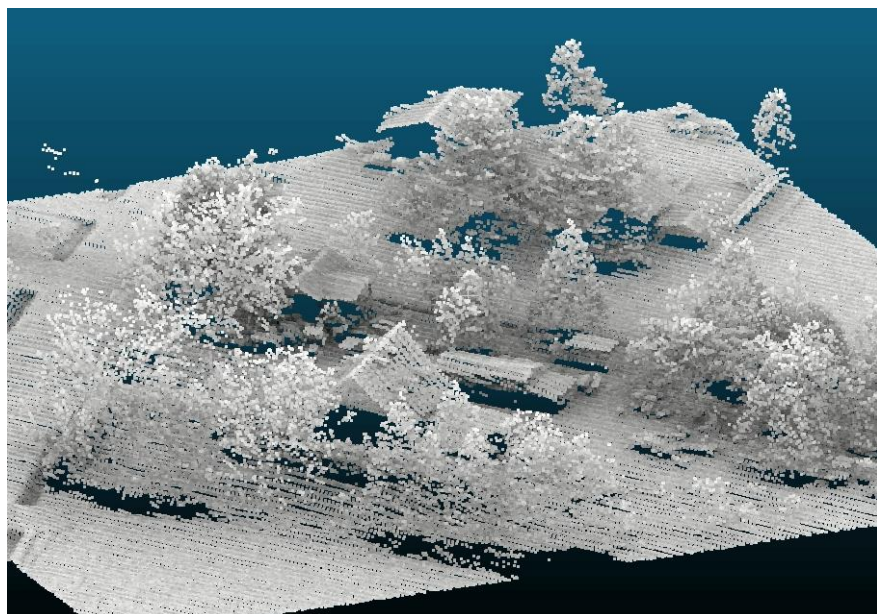




Besoin d'automatisation

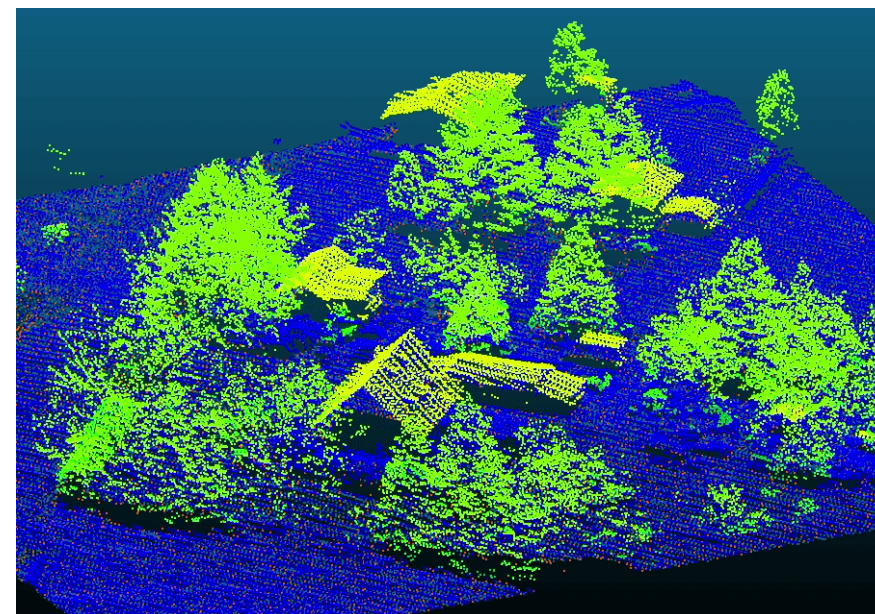
Nuage de points LiDAR :

- Informations géométriques des *surfaces*
- Informatiquement *lourd*
- Non sémantisé



Sémantisation :

- Difficulté de compréhension et de sélection
- Grande quantité de données
- Utilisation du **Machine Learning**





Problématique : manque de vérité terrain

Deep Learning sur nuage de points :

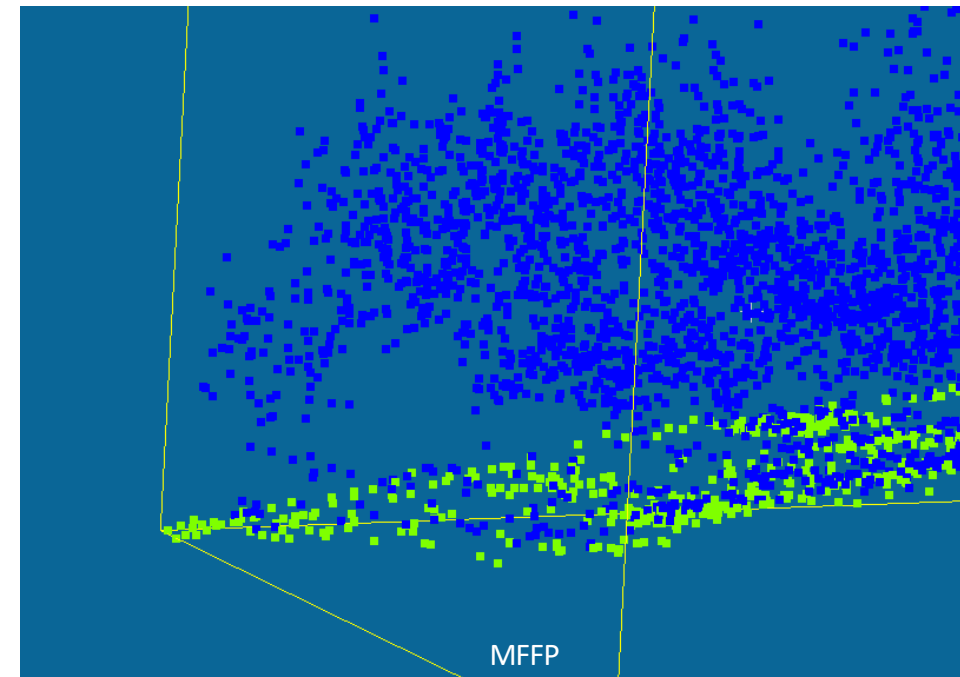
- Supérieur aux approches de ML classiques
- Nécessite grande quantité d'annotations



Paris-Lille 3D, Source : [4]

...en milieu forestier :

- Annotations **pauvres** et de **faible qualité**
- Environnement 3D complexe





Solution envisageable

Simulation de vérité terrain :

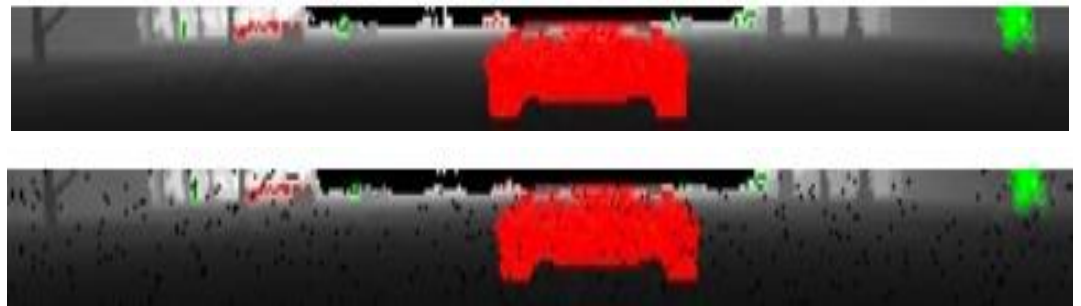
- [Wu et al., 2015] : Utilisée couramment
- [Dosovitskiy et al., 2015] : Transfert possible, même avec modélisation éloignée
- [Zhao et al., 2020b] : Simulation LiDAR



Source : [5]



Source : [6]



Source : [7]



Simulation pour le DL

Critères de la simulation :

1. Réduction de l'écart entre distribution statistique **simulée** et **réelle**
2. Maximisation de l'informativité de la simulation

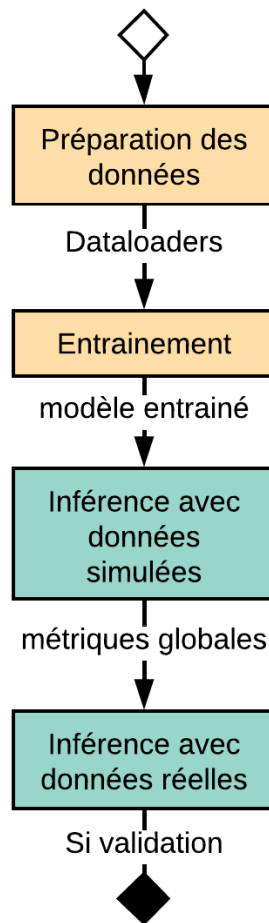
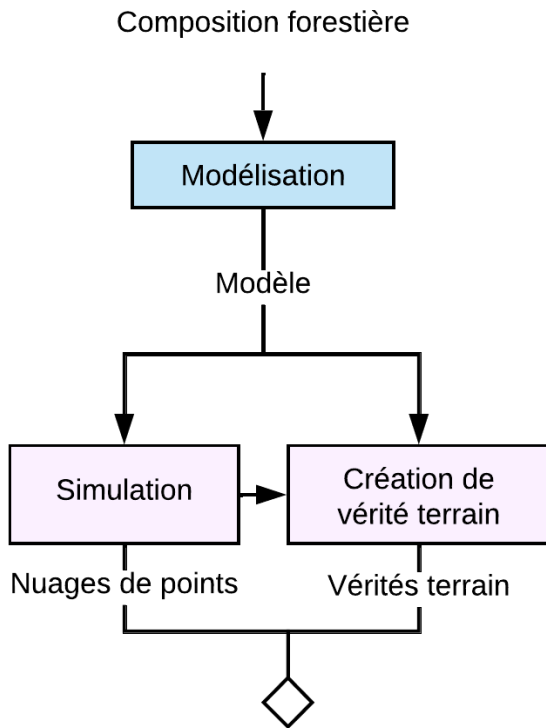


Source : Philippe Giguère



Question de recherche

Quel est l'**impact** de la **densité d'acquisition** sur la qualité de la **segmentation sémantique** d'un nuage de point ALS en forêt boréale ?



Méthodologie

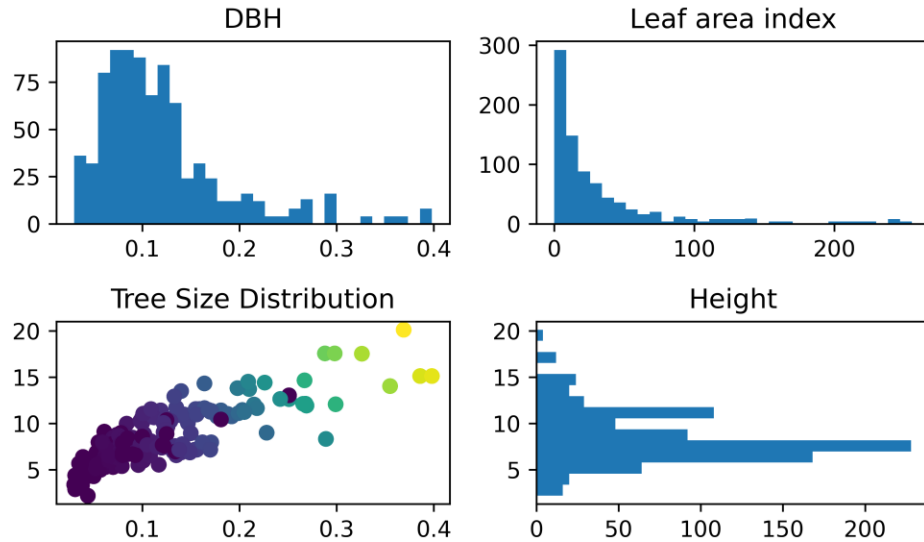
1. Modélisation
2. Simulation
3. Entrainement
4. Validation des modèles



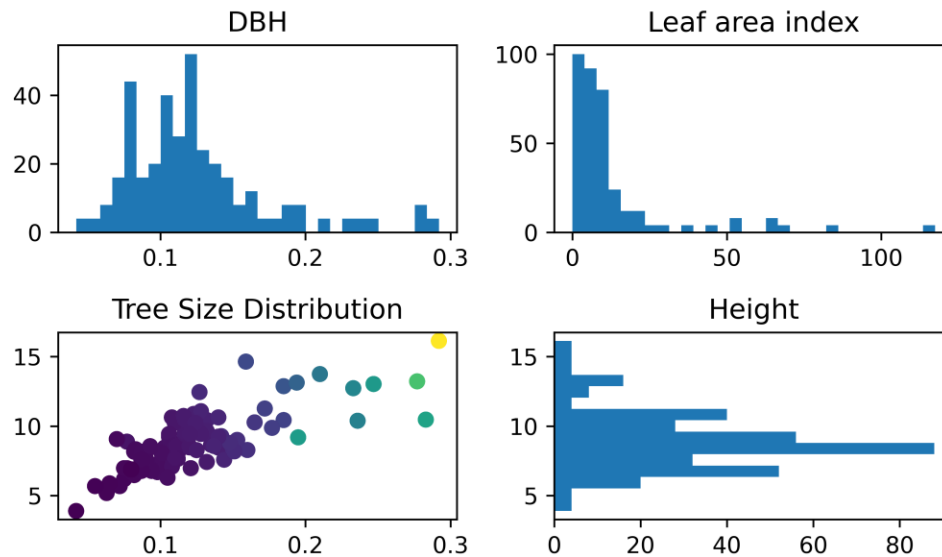
Modélisation

1. Choix de la composition forestière
2. Modèles d'arbres
3. Modélisation de la structure spatiale de la forêt
4. Modélisation du sol

Abies Balsamea n=833



Picea Mariana n=364



Choix de composition

Composition forestière : Pessière noire à mousses

1. Epicéa Noir : *picea mariana*
2. Sapin Baumier : *abies balsamea*

Bibliothèque d'arbre : Jean François Côté (RNCan)

- 1197 arbres
- 827 feuillages non nuls

Modèles d'arbres

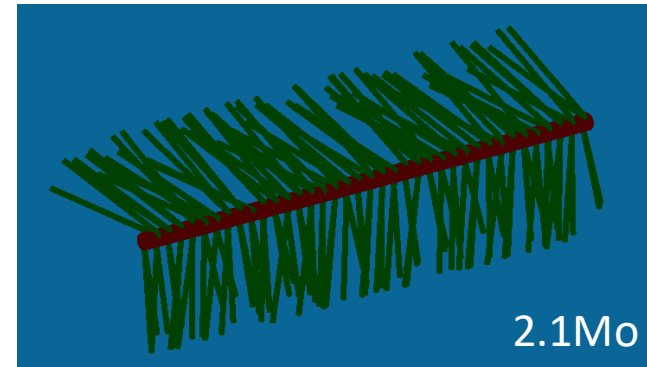
Origine :

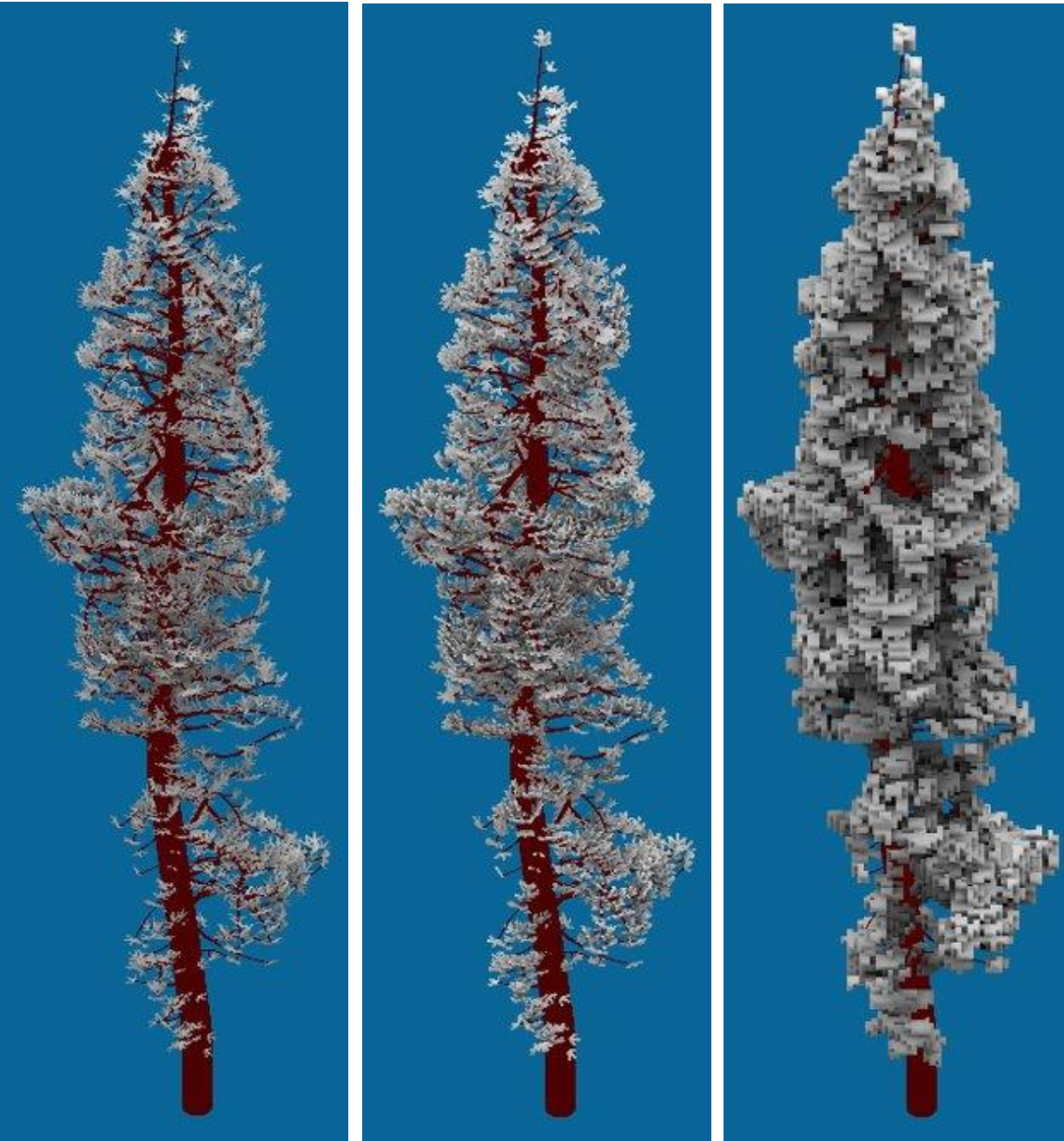
- Modélisation à partir de TLS
- Estimation du **feuillage** via **intensité**

Stockage :

- Structure ligneuse [.obj]
- 5 types de **pousses** par **espèces** [.obj]
- Tableau de **position** des **pousses**

Modèles volumineux

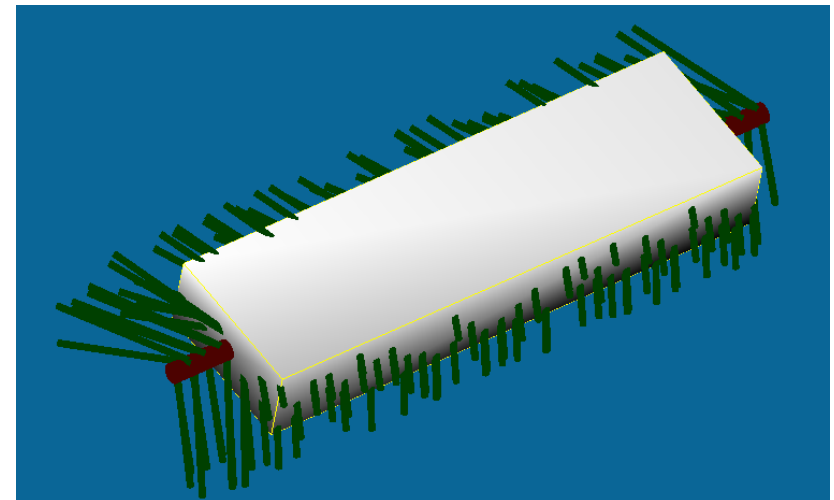




Modèles d'arbres

Simplifications :

- Objet 2D : 4 points, 2 triangles
- Objet 3D : 8 points, 12 triangles
- Voxels à médium turbide





Modélisation : Structure spatiale

Baseline aléatoire :

- Paramètres variables (combinatoire pour génération de n placettes):

1. Nombres d'arbres : 1 à 121
2. Mélange d'espèces : 100% Ab et 0% Pm à 0% Ab et 100% Pm

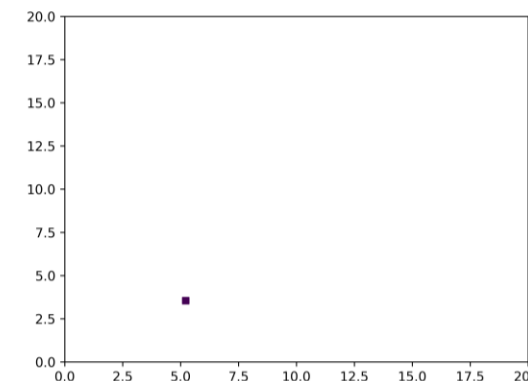


- Paramètre fixe :

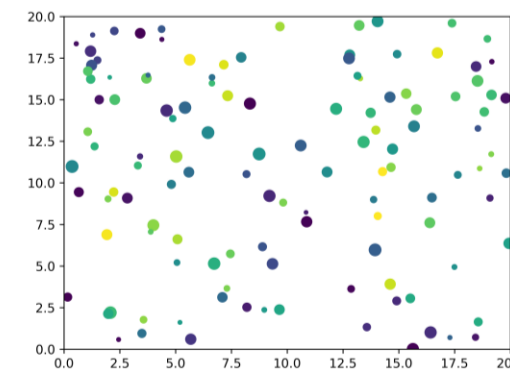
- Taille de placette : 20 m par 20 m

- Paramètres aléatoires :

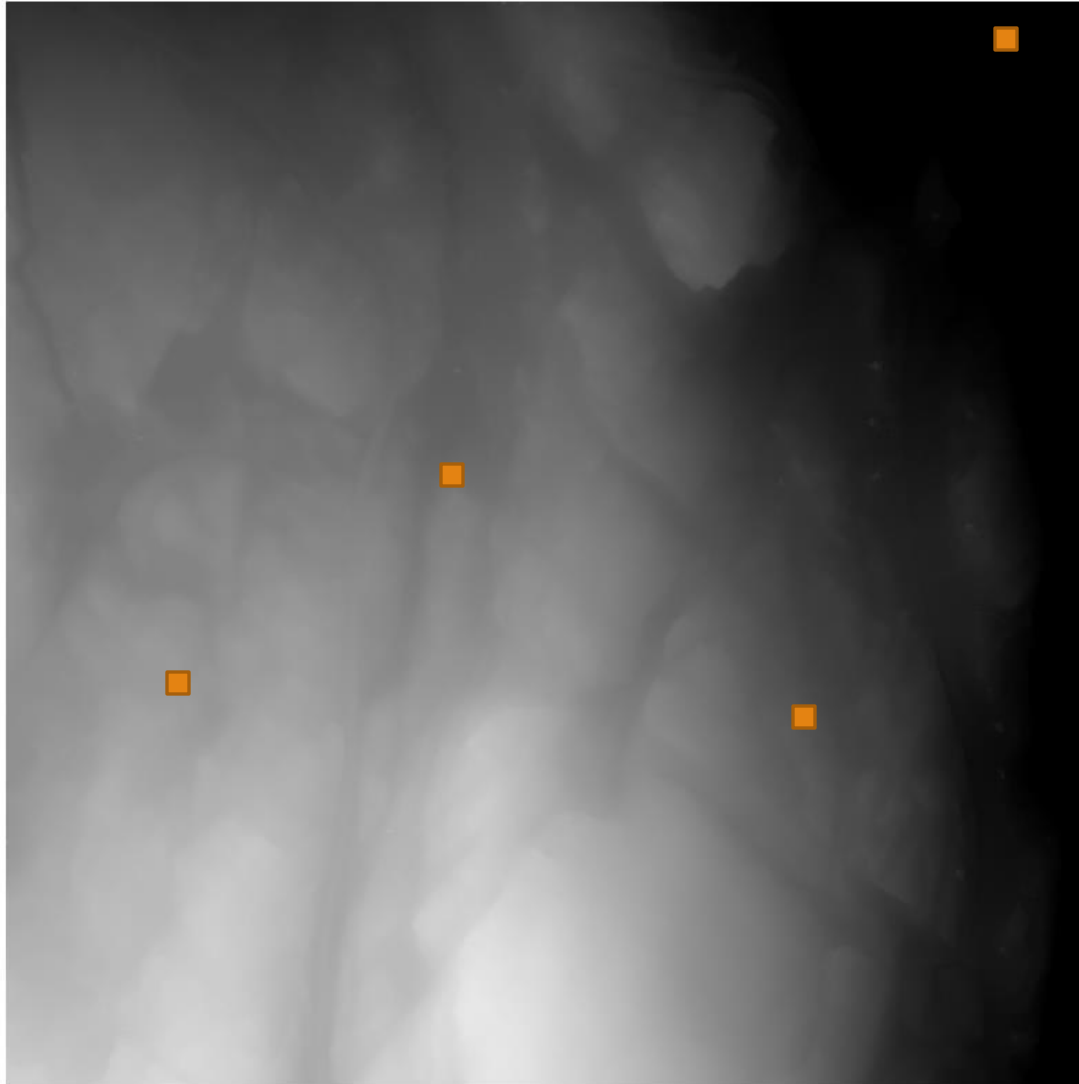
- Positionnement en X : uniforme de 0 à 20 m
- Positionnement en Y : uniforme de 0 à 20 m
- Hauteur : uniforme de 2 à 20 m
- DBH : uniforme de 0.03 à 0.43 cm



Placette 1 : $N_{\text{arbres}}=1$, Ab=100%, Pm=0%



Placette n : $N_{\text{arbres}}=121$, Ab=0%, Pm=100%



Modélisation : Sol

À partir d'un MNT réel:

- Issu d'ALS
- Valeurs significatives :
 - Hauteur min : 150.319 m
 - Hauteur max : 309.480 m
 - Surface : 1 km²
 - Résolution : 10 cm
- Zones planes et zones de relief
- Transitions douces et abruptes



Simulation

1. Outils de simulation
2. Paramètres d'acquisitions
3. Traitement de la simulation
4. Création des jeux d'entraînement



Choix de l'outil de simulation



Heidelberg LiDAR Operation Simulator :

- Rapidité de simulation
- Annotation des points avec ID de l'objet

Source : [10]



Paramètres d'acquisition

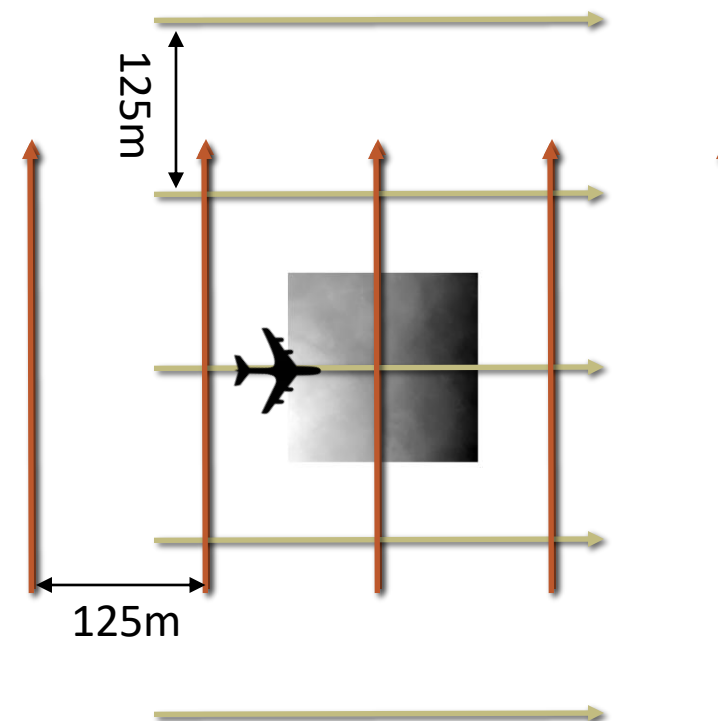
Objectif : 10 pts/m² minimum au sol

Paramètres de scan :

- Fréquence de pulsation : 500 000 Hz
- Angle de scan max 15 deg
- Fréquence de balayage : 100 Hz

Paramètres du plan de vol :

- Hauteur de vol : 1200 m
- Vitesse 74.59 m/s (268.5 km/h)
- Trajet : 10 passes





Traitement de la simulation

Objectif de la simulation :

- Env. 225 millions de points par classe
- 3 classes : Ab, Pm et sol

675 millions de points

Nombre de placettes requises:

- Surface placette : 400 m²
- Densité d'acquisition moyenne : 18 pts/m²
- 10 passes

**10250 placettes
(700+ millions points)**



Traitement de la simulation

Ressources informatiques nécessaires :

- Volume en RAM maximal estimé : 110 Go
- Principale perte de temps : Chargement en RAM
- Temps moyen par placette : 1h04

Compute Canada :

- Répartition de la charge sur 1000 jobs



compute | **calcul**
canada | canada

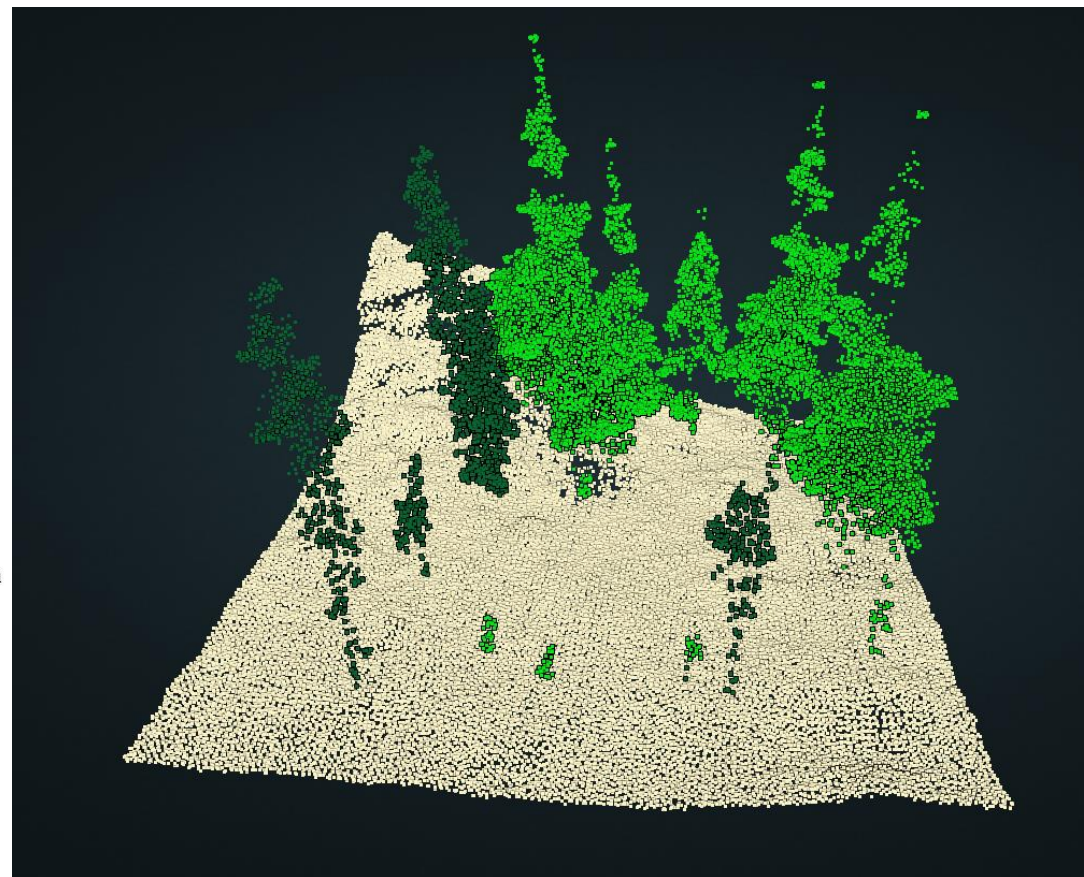
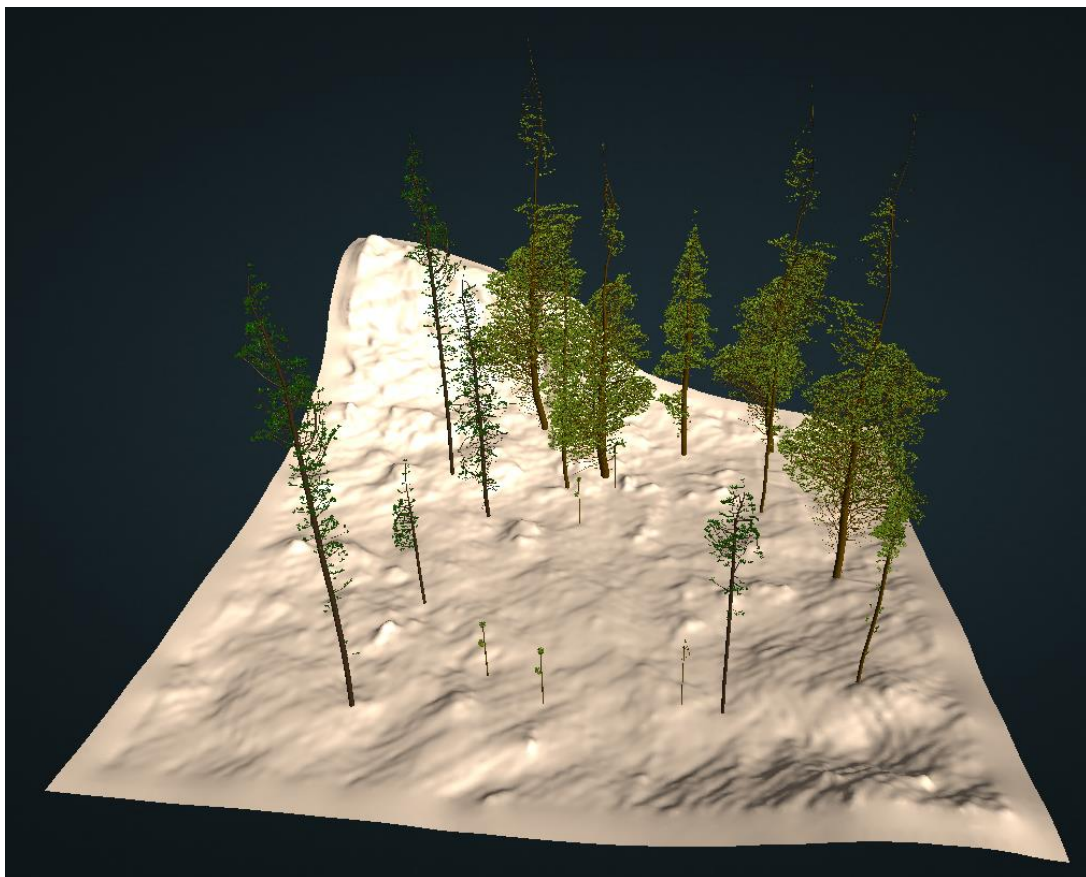
109 Jours de calculs



3h de calculs



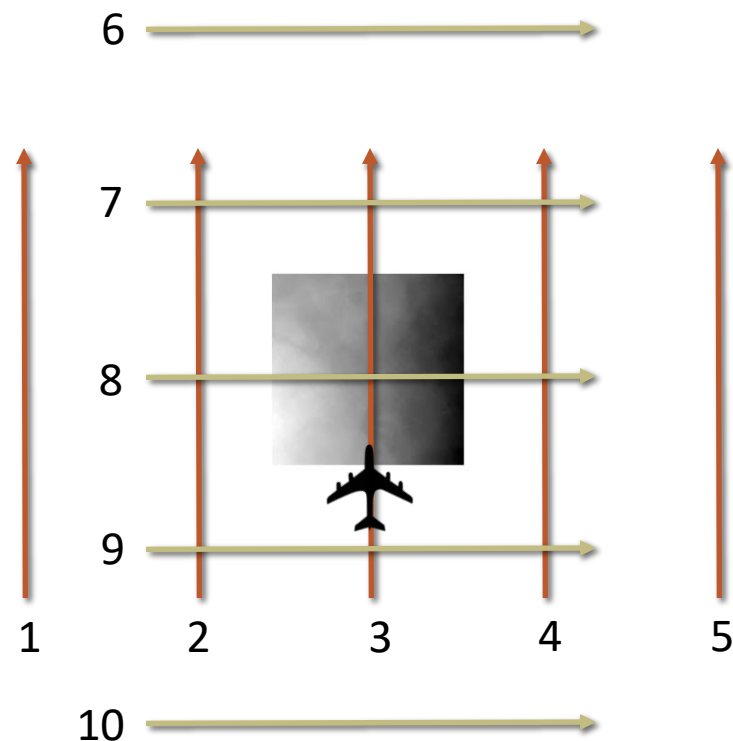
Traitement de la simulation





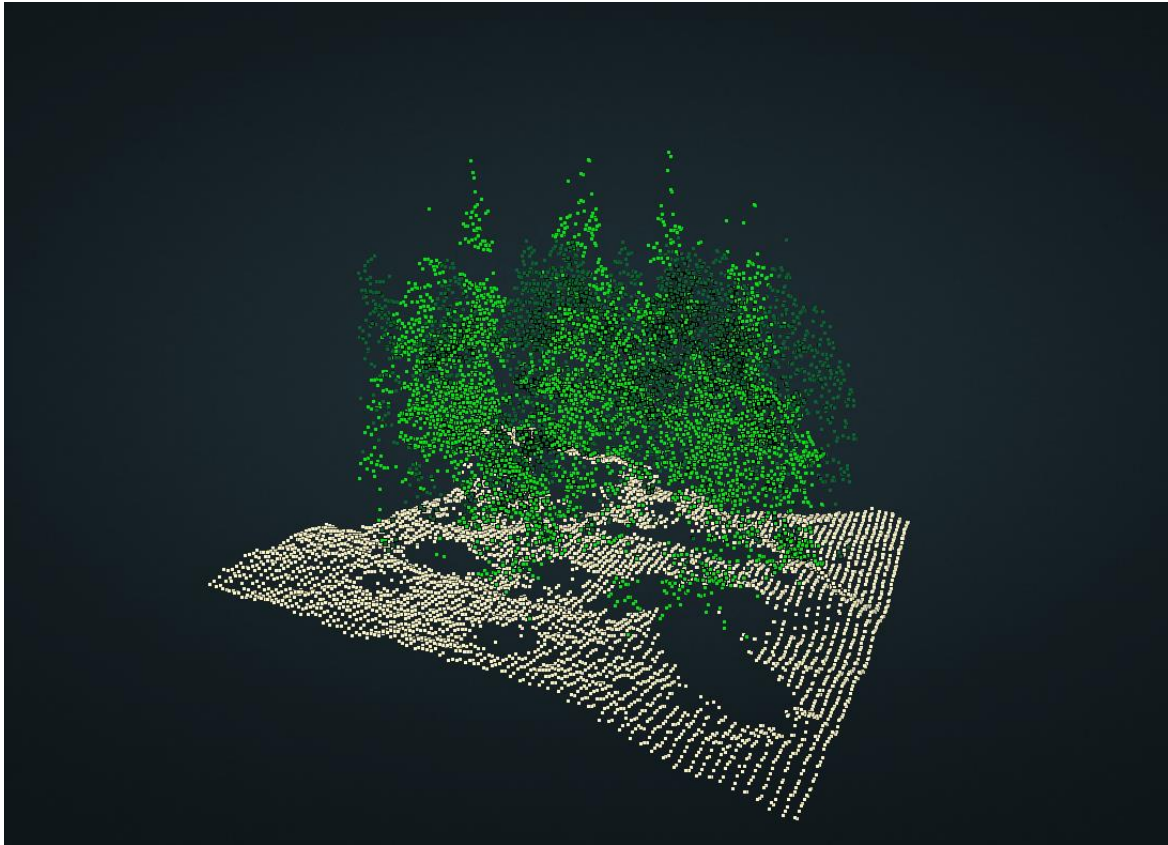
Création des jeux d'entraînement

Jeu	Passes utilisées	Densité moyenne
1	3	23
2	2,4	45
3	1,3,5	67
4	1,2,4,5	89
5	1,2,3,4,5	112
6	1,2,3,4,5,8	135
7	1,2,3,4,5,7,9	158
8	1,2,3,4,5,6,8,10	179
9	1,2,3,4,5,6,7,9,10	202
10	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	225

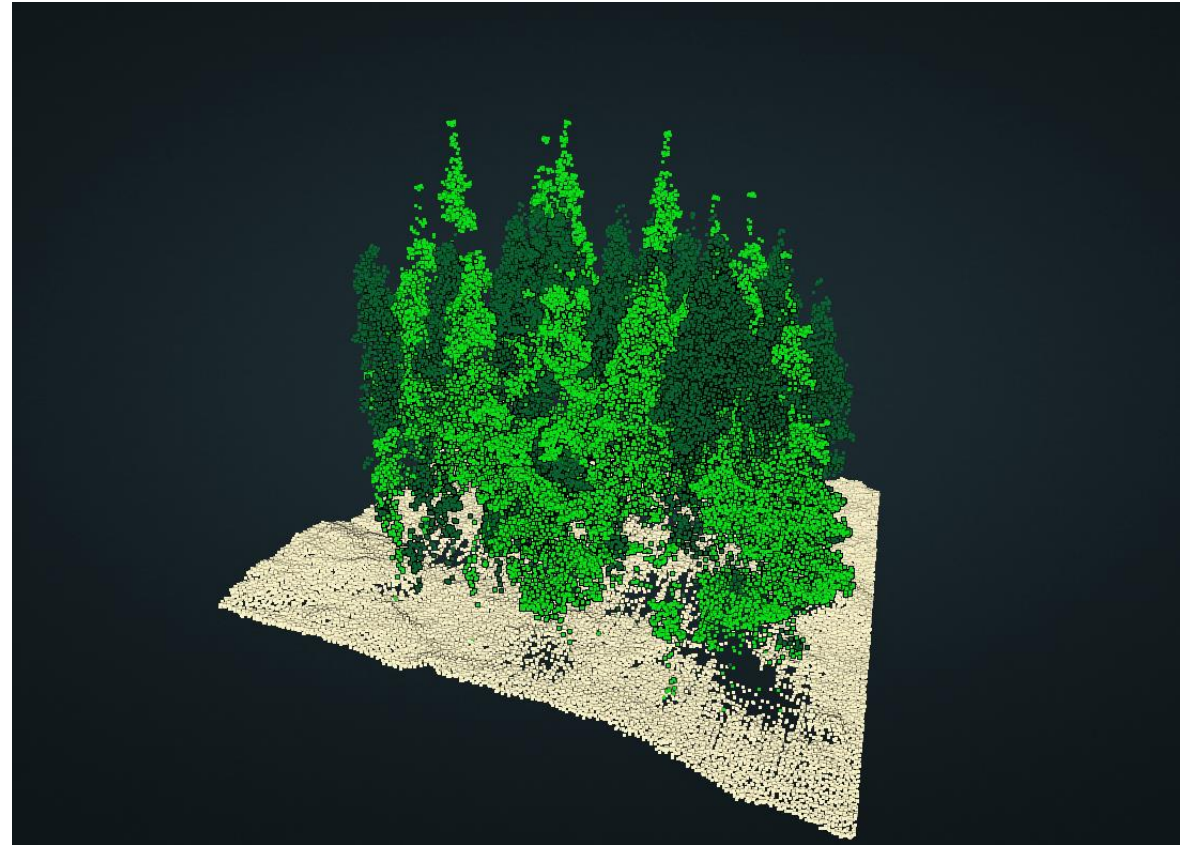




Jeu de données simulées



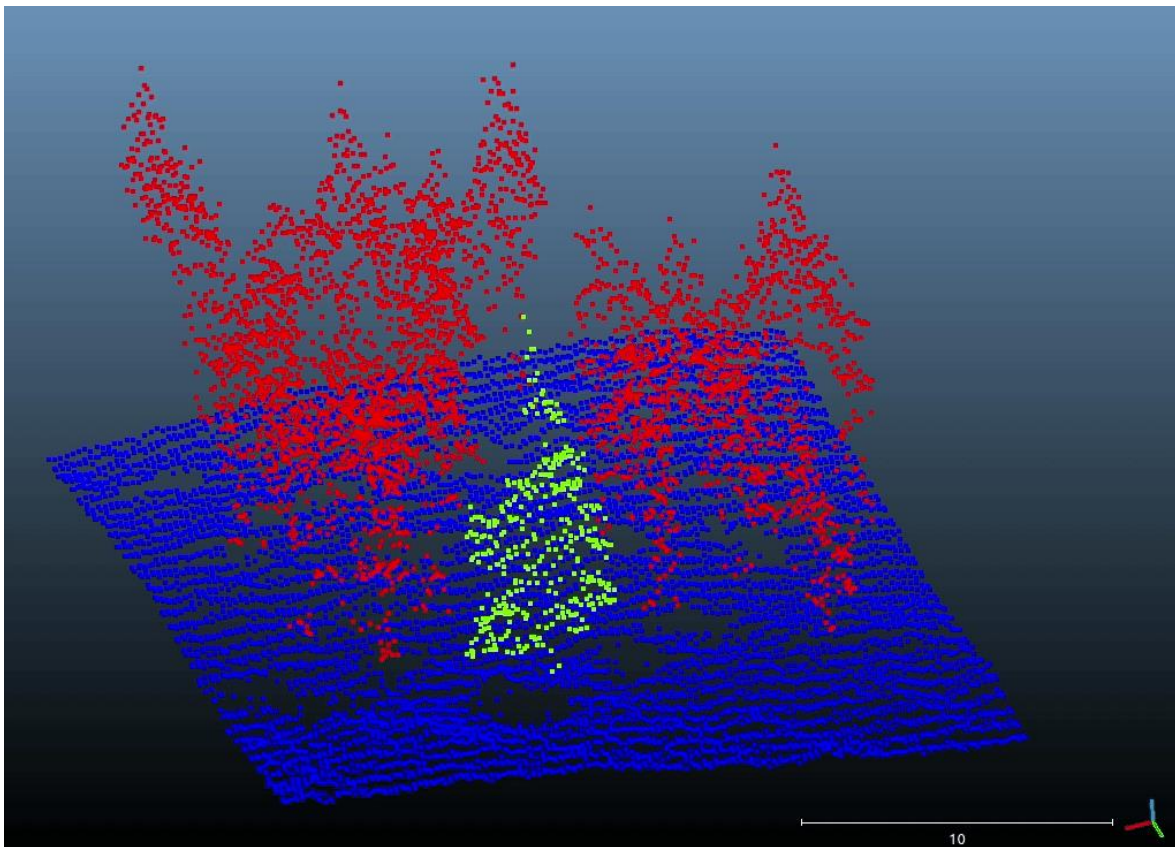
Jeu 1 : Densité 23 pts/m²



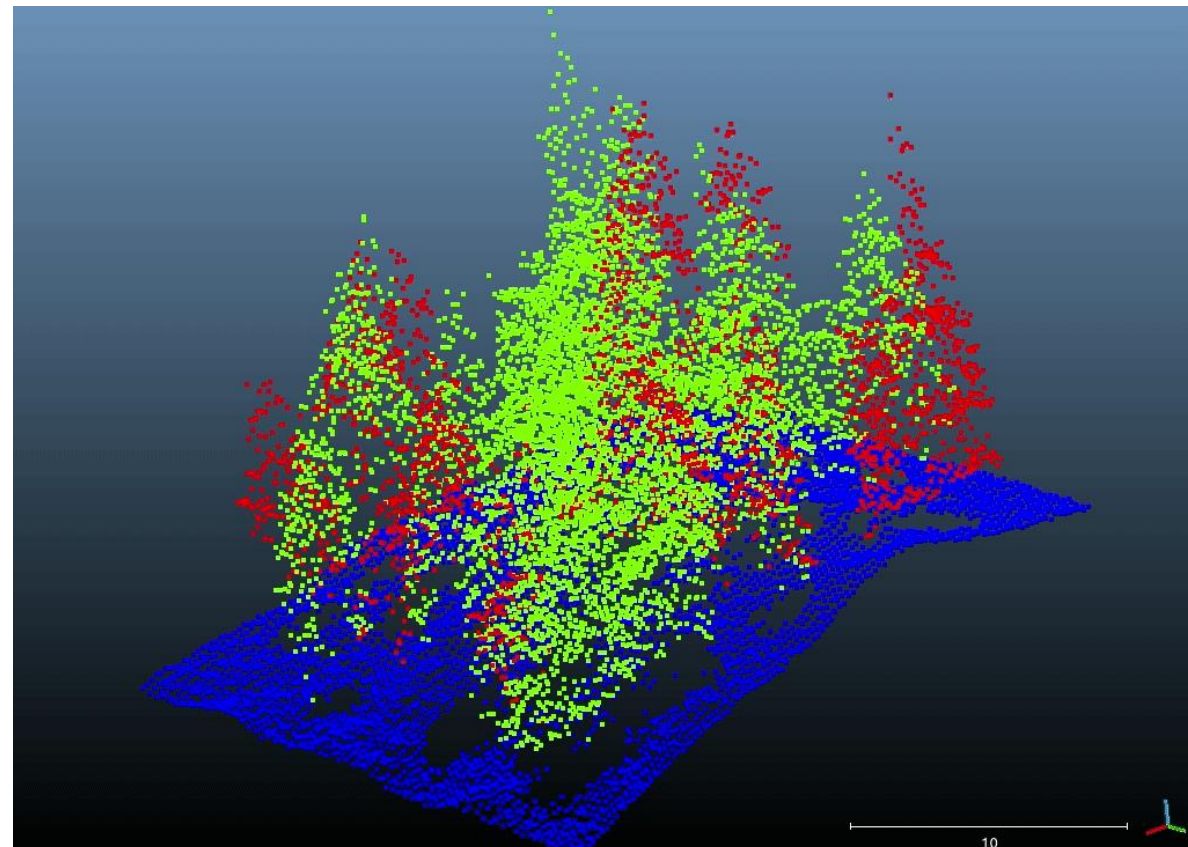
Jeu 10 : Densité 225 pts/m²



Jeu de données simulées



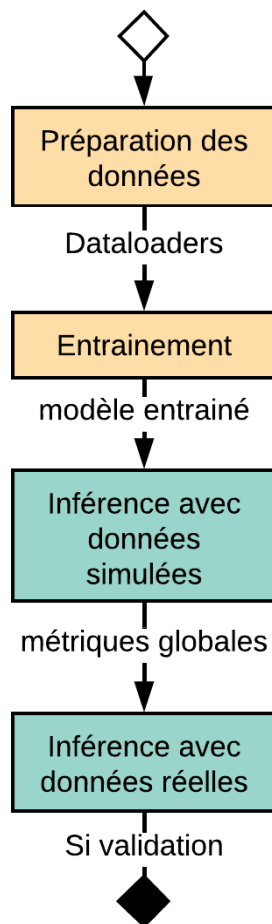
Placette à forte présence de *picea mariana*



Placette mixte

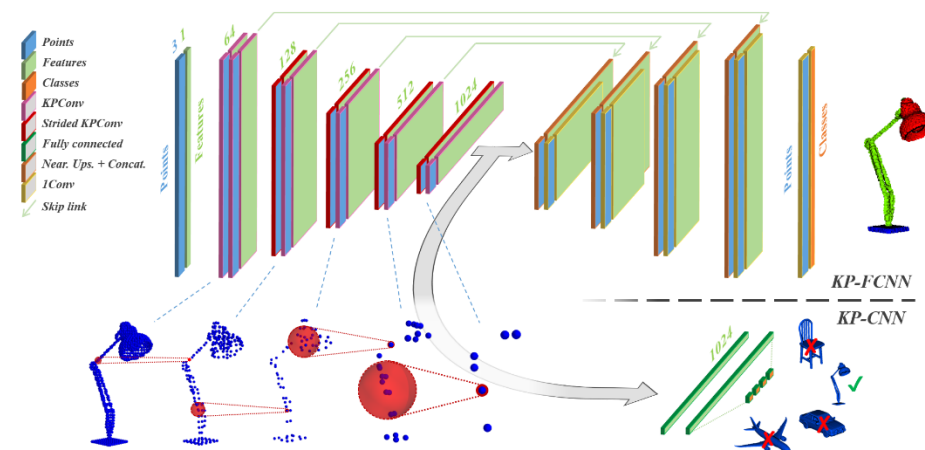


Partie 2 : Entraînement et validation des modèles



Entraînement :

- KPConv [12]

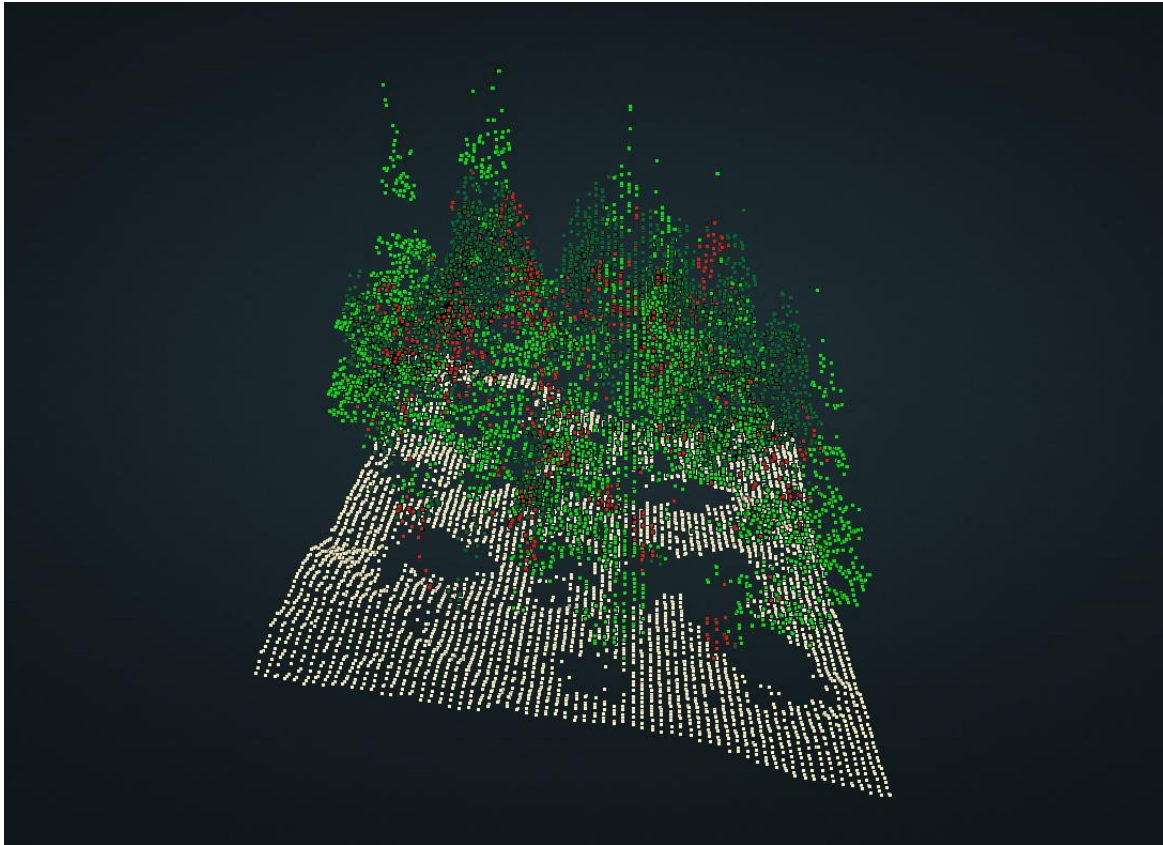


Validation :

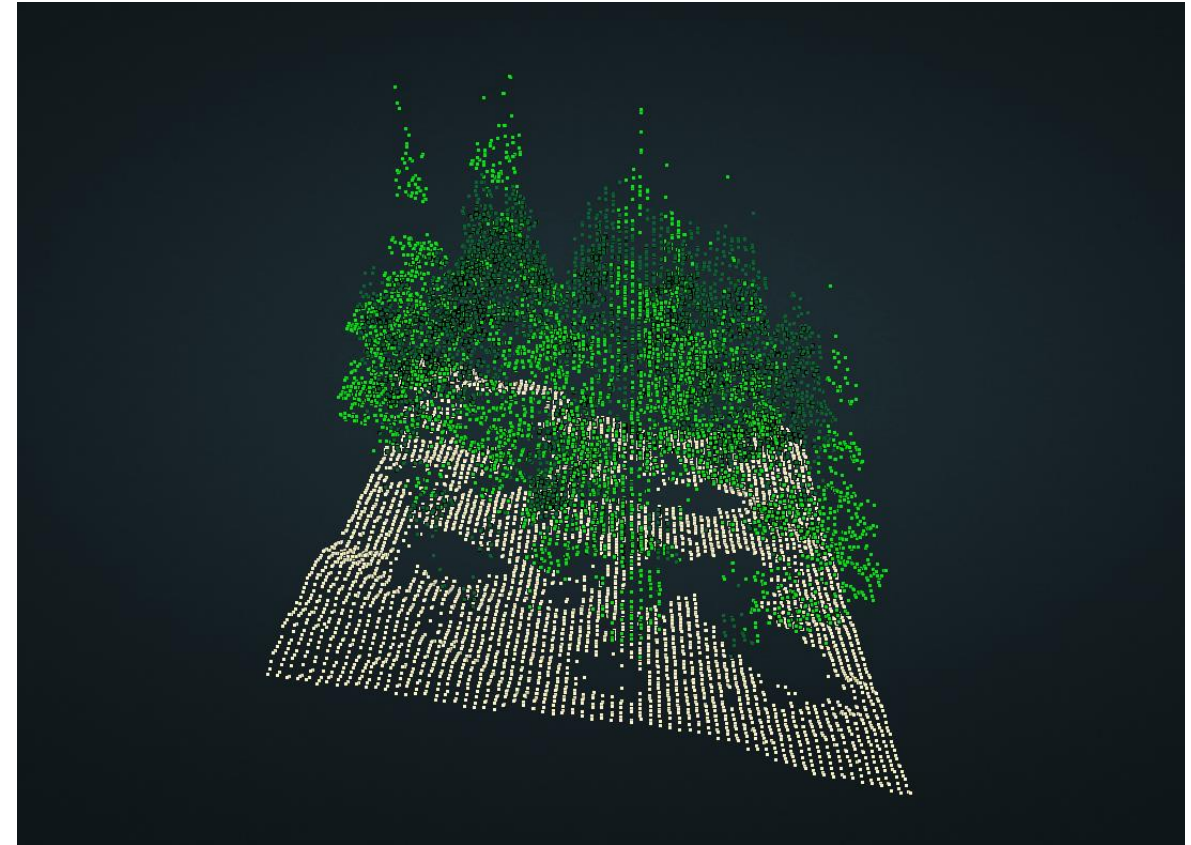
- Sur données simulées : Métriques globales et analyses visuelles



Résultat de segmentation sémantique



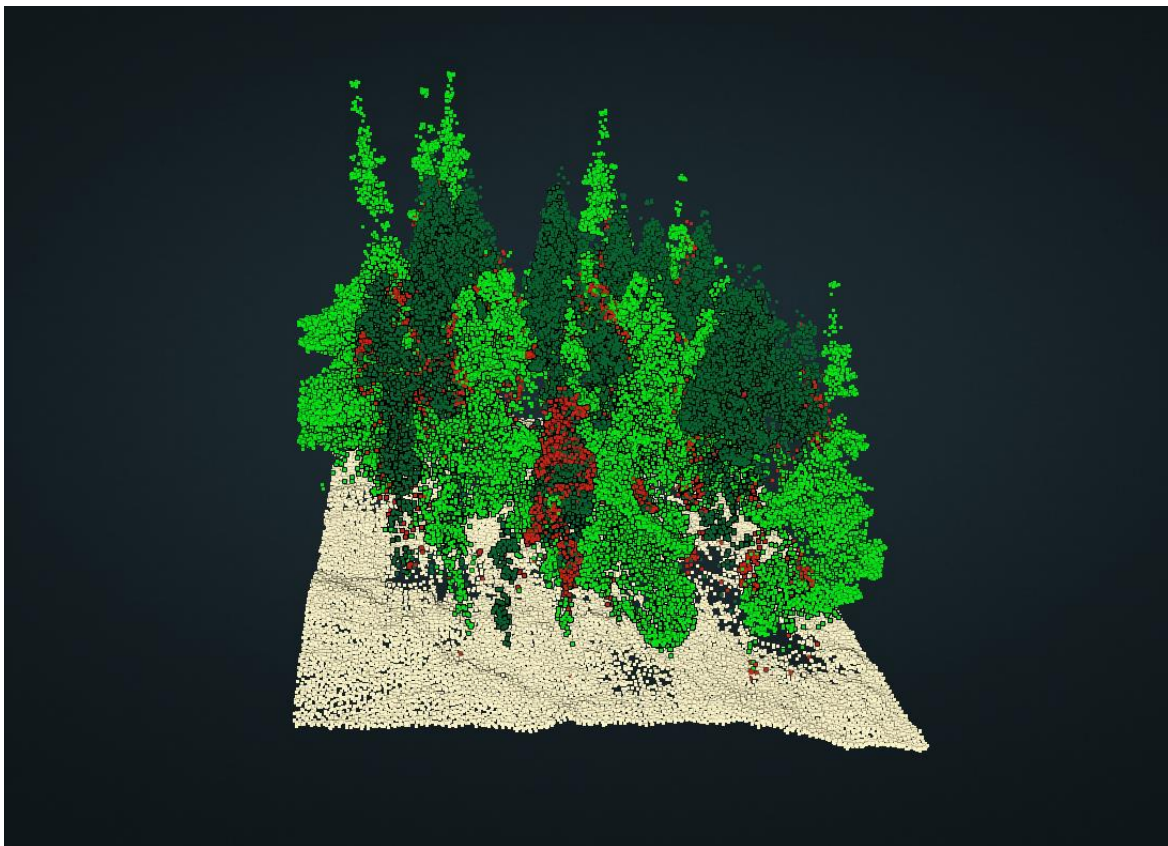
Jeu 1 : Erreurs de prédiction



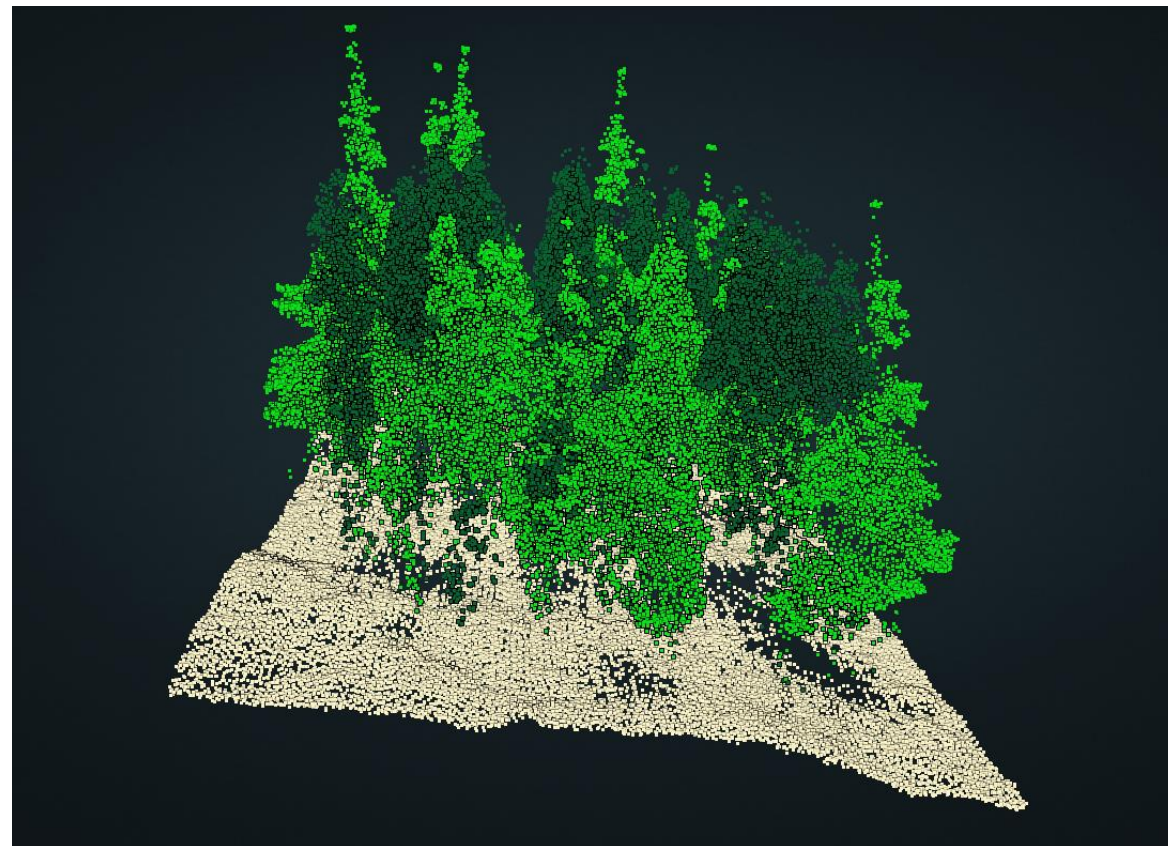
Jeu 1 : Prédiction



Résultat de segmentation sémantique



Jeu 10 : Erreurs de prédiction



Jeu 10 : Prédiction

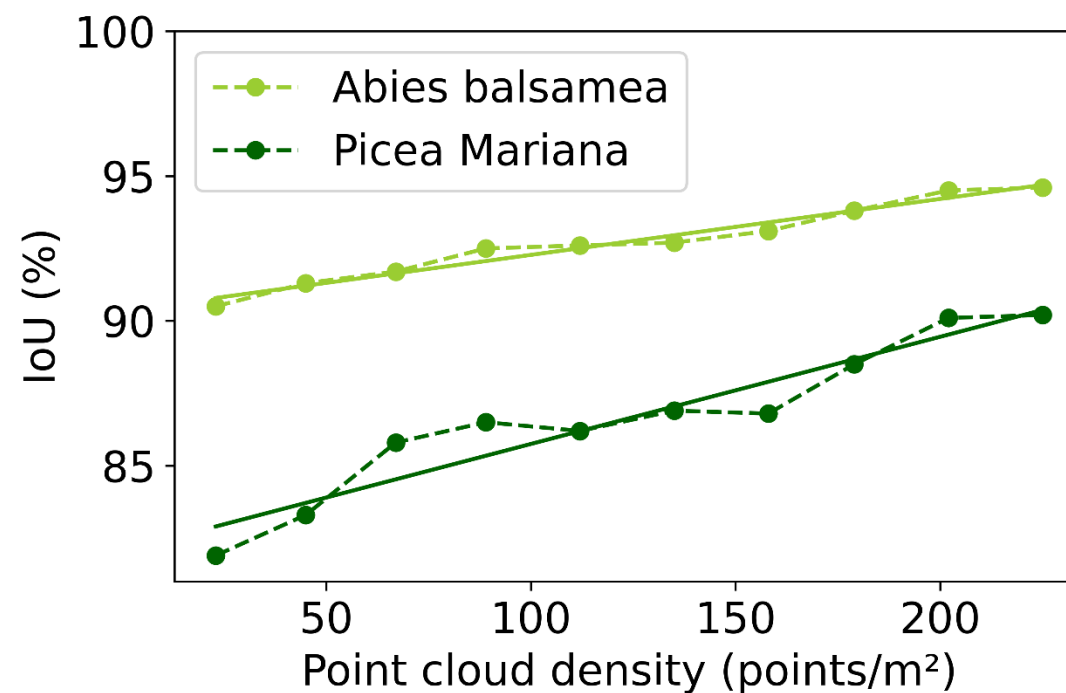
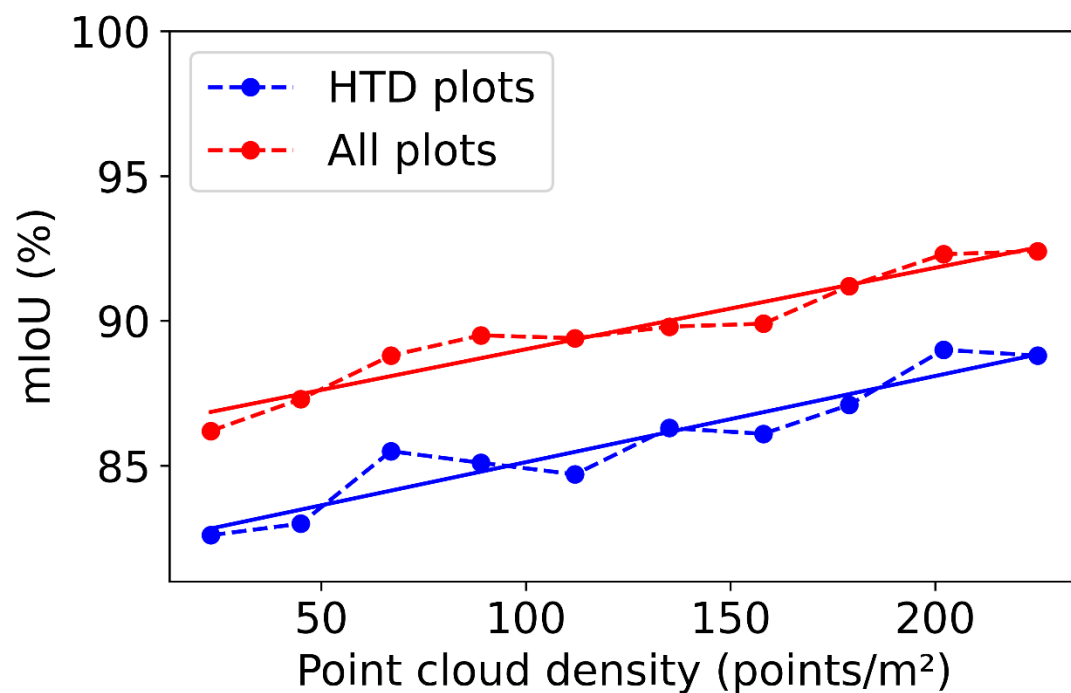


Résultat de segmentation sémantique

IoU des placettes										
Jeu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ground	99.9	99.9	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
<i>Abies balsamea</i>	90.5	91.3	91.7	92.5	92.6	92.7	93.1	93.8	94.5	94.6
<i>Picea mariana</i>	81.9	83.3	85.8	86.5	86.2	86.9	86.8	88.5	90.1	90.3
mIoU	90.8	91.5	92.4	92.9	92.9	93.2	93.3	94.1	94.8	94.9
Tree-mIoU	86.2	87.3	88.8	89.5	89.4	89.8	89.9	91.2	92.3	92.5



Résultat de segmentation sémantique



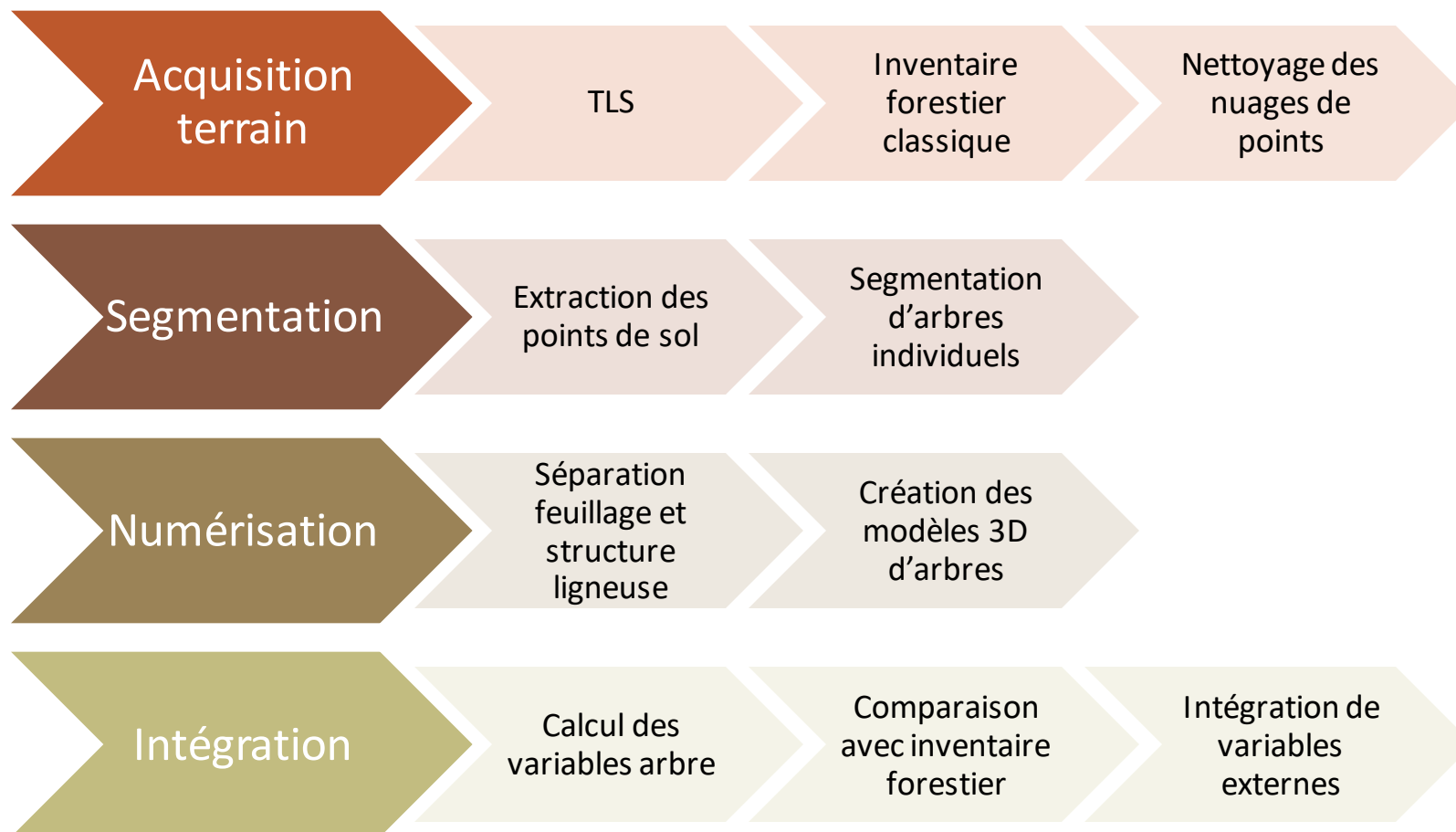
Augmentation de 0,3% de mIoU par 10 pts/m²

Limites des Modèles Numériques Forestiers



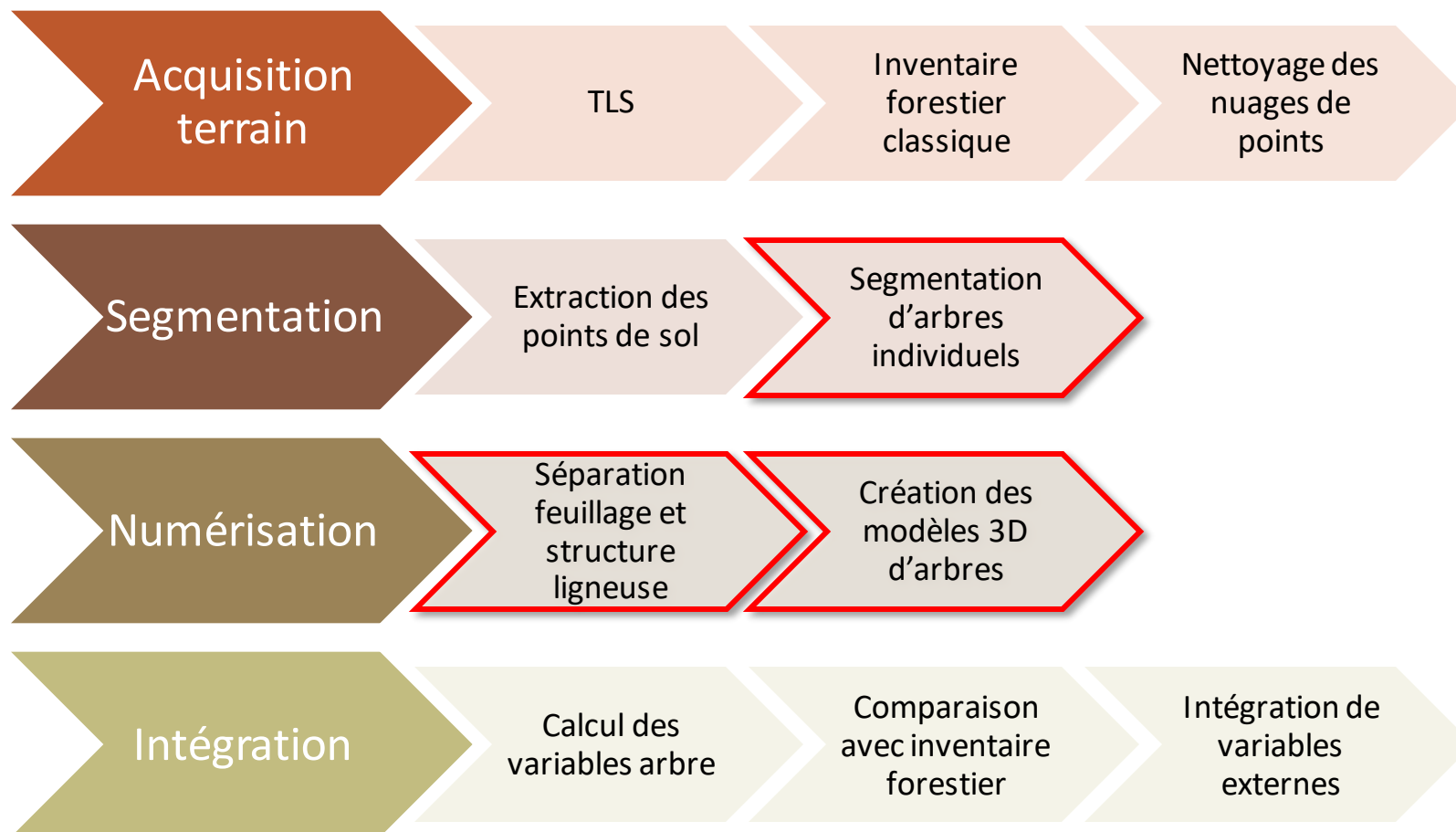


Création d'un Modèle Numérique Forestier





Création d'un Modèle Numérique Forestier

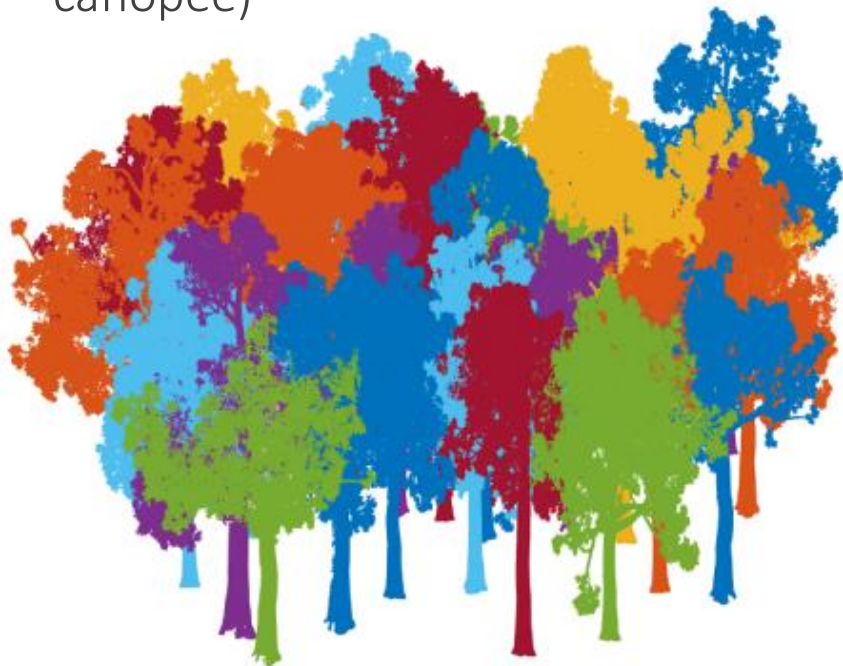




Limites : Segmentation

Segmentation d'arbres individuels :

- Sensibilité à la densité d'arbres
- Difficultés pour les jeunes arbres (sous la canopée)



Segmentation feuillage/structure ligneuse :

- Méthodes imparfaites
- Information LiDAR ponctuelle, donc incomplète



Source : [14]



Limites : Modélisation

Algorithmes QSM de reconstruction d'arbres :

- Condition **sans feuillage** nécessaire
- Algorithmes **conifères imparfaits**

Algorithmes de reconstruction de feuillage :

- Basés sur des **règles mathématiques**
- **Dépendant** de nombreuses **variables terrain**
- **Attributs spectraux** des objets **manquants** par acquisition LiDAR



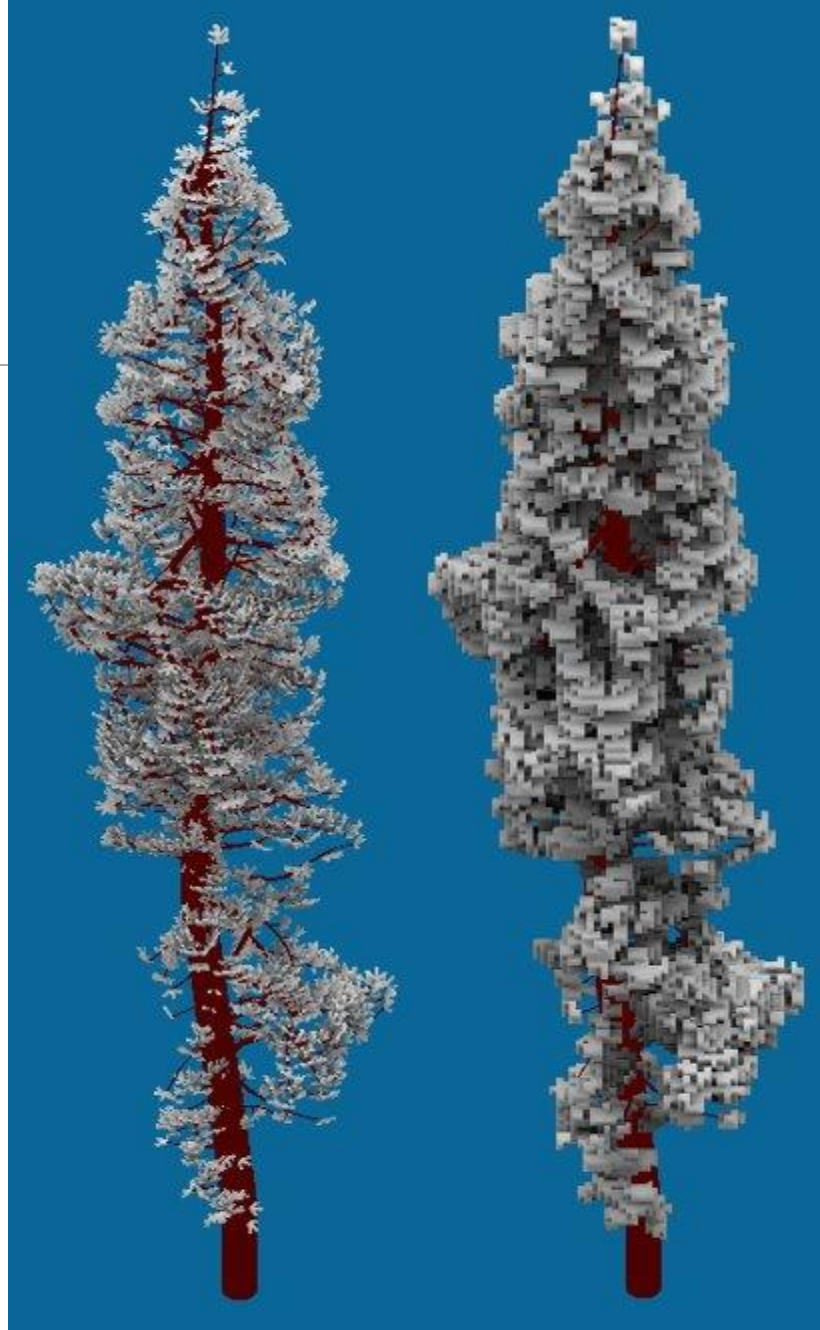
Source : [16]

Limites : Niveau de détails

Zones de simplifications :

- Échelle de la modélisation
- Nombre de variables
- Nombre d'éléments dans la modélisation

Modélisation = Simplification



Conclusions

Jumeaux numériques pour le milieu forestier = immatures

Modèles numériques forestiers = efficaces pour l'amélioration de la vision par ordinateur

Barrières technologiques et méthodologiques fortes avant l'essor de jumeaux numériques forestiers

Merci de votre attention

- [1] Widłowski J. L., Robustelli M., Disney M., Gastellu-Etchegorry J.-P., Lavergne T., Lewis P., North P. R. J., Pinty B., Thompson R. and Verstraete M. M., The RAMI On-line Model Checker (ROMC): A web-based benchmarking facility for canopy reflectance models (2008), *Remote Sensing of Environment*, 112 (3), p. 1144-1150.
- [2] Gauthier, S., Bernier, P., Burton, P. J., Edwards, J., Isaac, K., Isabel, N., ... & Nelson, E. A. (2014). Climate change vulnerability and adaptation in the managed Canadian boreal forest. *Environmental Reviews*, 22(3), 256-285.
- [3] Fassnacht, F., Latifi, H., Stereńczak, K., Lefsky, M., Straub, C., Waser, L., Ghosh, A., and Modzelewska, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 184. Review Lidar for forestry and species classification.
- [4] Roynard, X., Deschaud, J. E., & Goulette, F. (2018). Paris-Lille-3D: A large and high-quality ground-truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification. *The International Journal of Robotics Research*, 37(6), 545-557.
- [5] Wu, Z., Song, S., Khosla, A., Yu, F., Zhang, L., Tang, X., & Xiao, J. (2015). 3d shapenets: A deep representation for volumetric shapes. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1912-1920).
- [6] Dosovitskiy, A., Fischer, P., Ilg, E., Hausser, P., Hazirbas, C., Golkov, V., van der Smagt, P., Cremers, D., and Brox, T. (2015). Flownet: Learning optical flow with convolutional networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*.
- [7] Zhao, S., Wang, Y., Li, B., Wu, B., Gao, Y., Xu, P., Darrell, T., and Keutzer, K. (2020b). epointda: An end-to-end simulation-to-real domain adaptation framework for lidar point cloud segmentation. *CoRR*, abs/2009.03456
- [8] Gadow, K., González, J., Zhang, C., Pukkala, T., and Zhao, X. (2021). *Analyzing Forest Ecosystems*, pages 81–158. Springer Netherlands.
- [9] Pommerening, A., & Stoyan, D. (2008). Reconstructing spatial tree point patterns from nearest neighbour summary statistics measured in small subwindows. *Canadian journal of forest research*, 38(5), 1110-1122.
- [10] Winiwarter, L., Esmoris Pena, A. M., Weiser, H., Anders, K., Martínez Sánchez, J., Searle, M., and Höfle, B. (2021). Virtual laser scanning with helios++: A novel take on ray tracing-based simulation of topographic full-waveform 3d laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, page 112772.
- [11] <https://pytreedb.geog.uni-heidelberg.de/>
- [12] Thomas, H., Qi, C. R., Deschaud, J., Marcotegui, B., Goulette, F., and Guibas, L. J. (2019). Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. *CoRR*, abs/1904.08889.
- [13] Zhao, H., Jiang, L., Jia, J., Torr, P. H. S., and Koltun, V. (2020a). Point transformer. *CoRR*, abs/2012.09164.
- [14] Wang, D. (2020). Unsupervised semantic and instance segmentation of forest point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 165, 86-97.
- [15] Buonocore, L., Yates, J., & Valentini, R. (2022). A proposal for a forest digital twin framework and its perspectives. *Forests*, 13(4), 498.
- [16] Raumonon, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Karttinen, H., Vastaranta, M., ... & Lewis, P. (2013). Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. *Remote Sensing*, 5(2), 491-520.
- [17] Nita, M. D., Candrea, B., Cucu-Dumitrescu, C., Grama, B., & Iuga, I. (2021, December). VirtSilv AI 3D platform for sustainable forest management. In *# PLACEHOLDER_PARENT_METADATA_VALUE#* (pp. 280-283).
- [18] <https://github.com/VUKOZ-OEL/3d-forest-classic>

<https://polarsensing.net/>