



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

Simulation d'acquisitions LiDAR aéroportées en milieu forestier pour l'entraînement de réseaux de Deep Learning

Olivier STOCKER⁽¹⁾, Éric GUILBERT⁽¹⁾, Jean-François CÔTÉ⁽²⁾, Antonio FERRAZ⁽³⁾, Thierry BADARD⁽¹⁾

(1) Université Laval

(2) Ressources naturelles Canada

(3) Jet Propulsion Laboratory NASA

TRIDIFOR – 20 SEPTEMBRE 2022

Sommaire



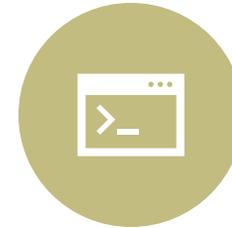
PROBLÉMATIQUE



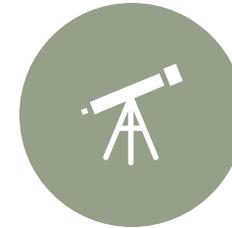
MÉTHODOLOGIE



MODÉLISATION



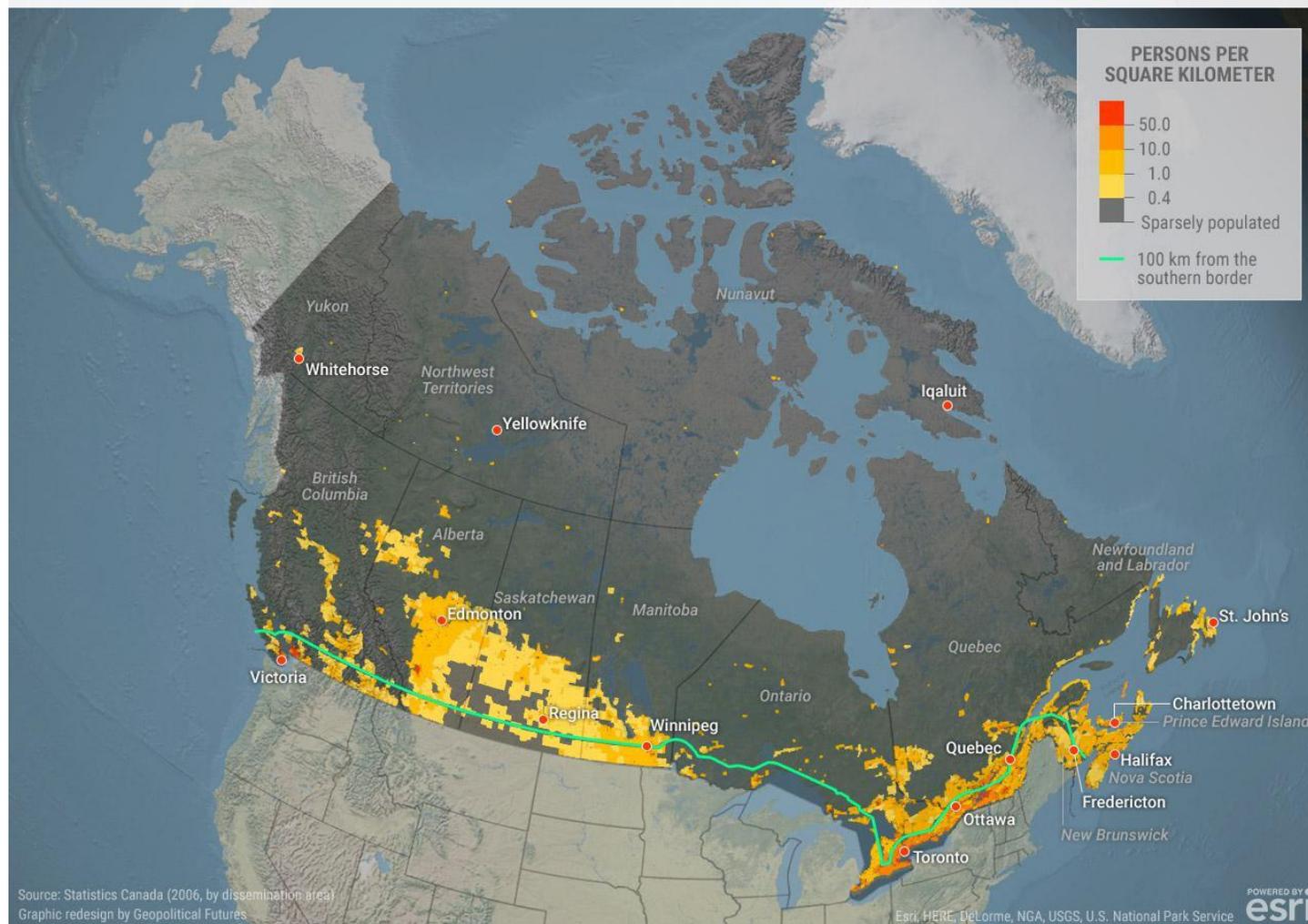
SIMULATION



PERSPECTIVES



POPULATION DENSITY OF CANADA



Source : [reddit](#)

Suivi du territoire

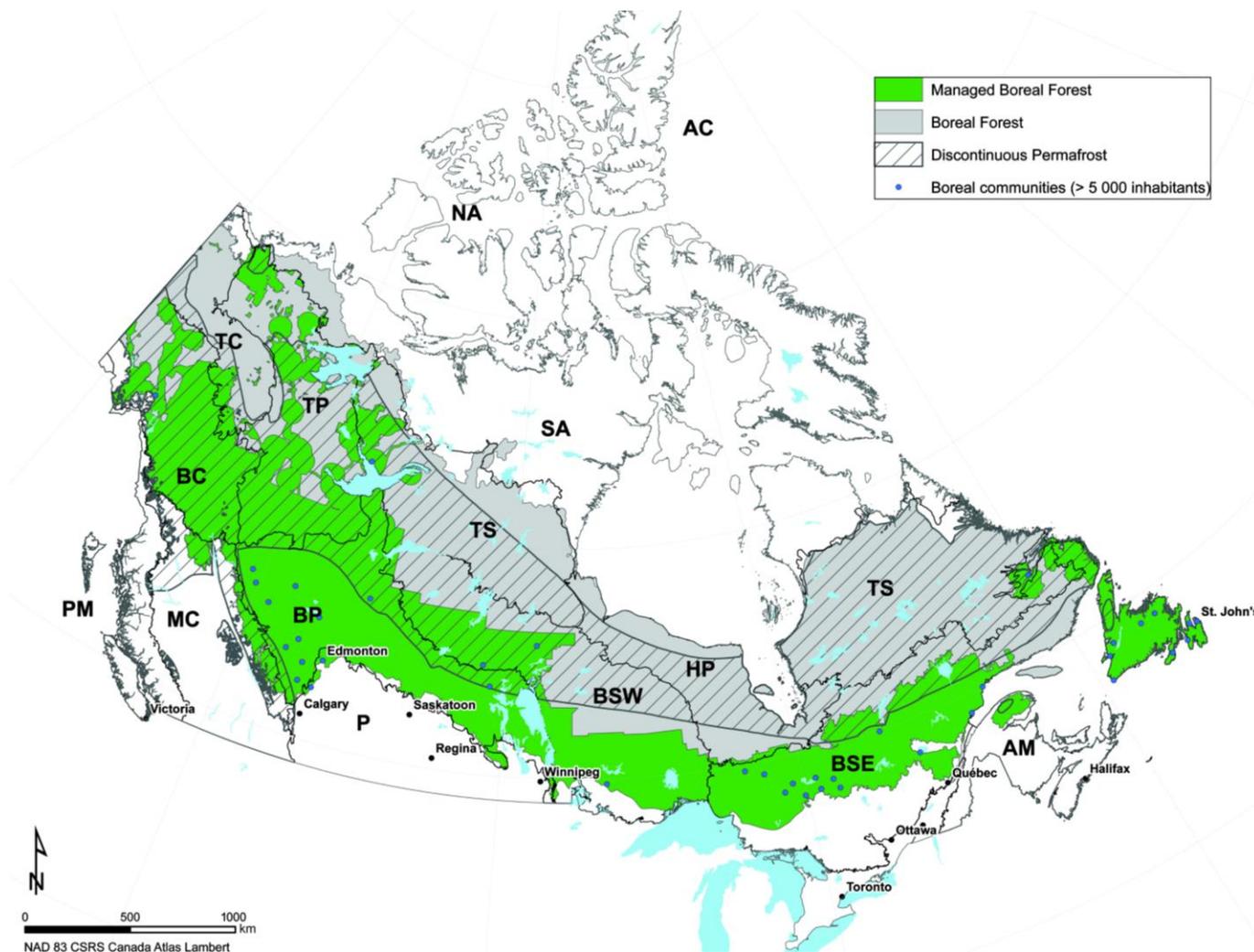
- Population canadienne inégalement répartie sur le territoire



Suivi du territoire

- Population canadienne inégalement répartie sur le territoire
- Grande quantité de **territoires non aménagés**

Source : [1]

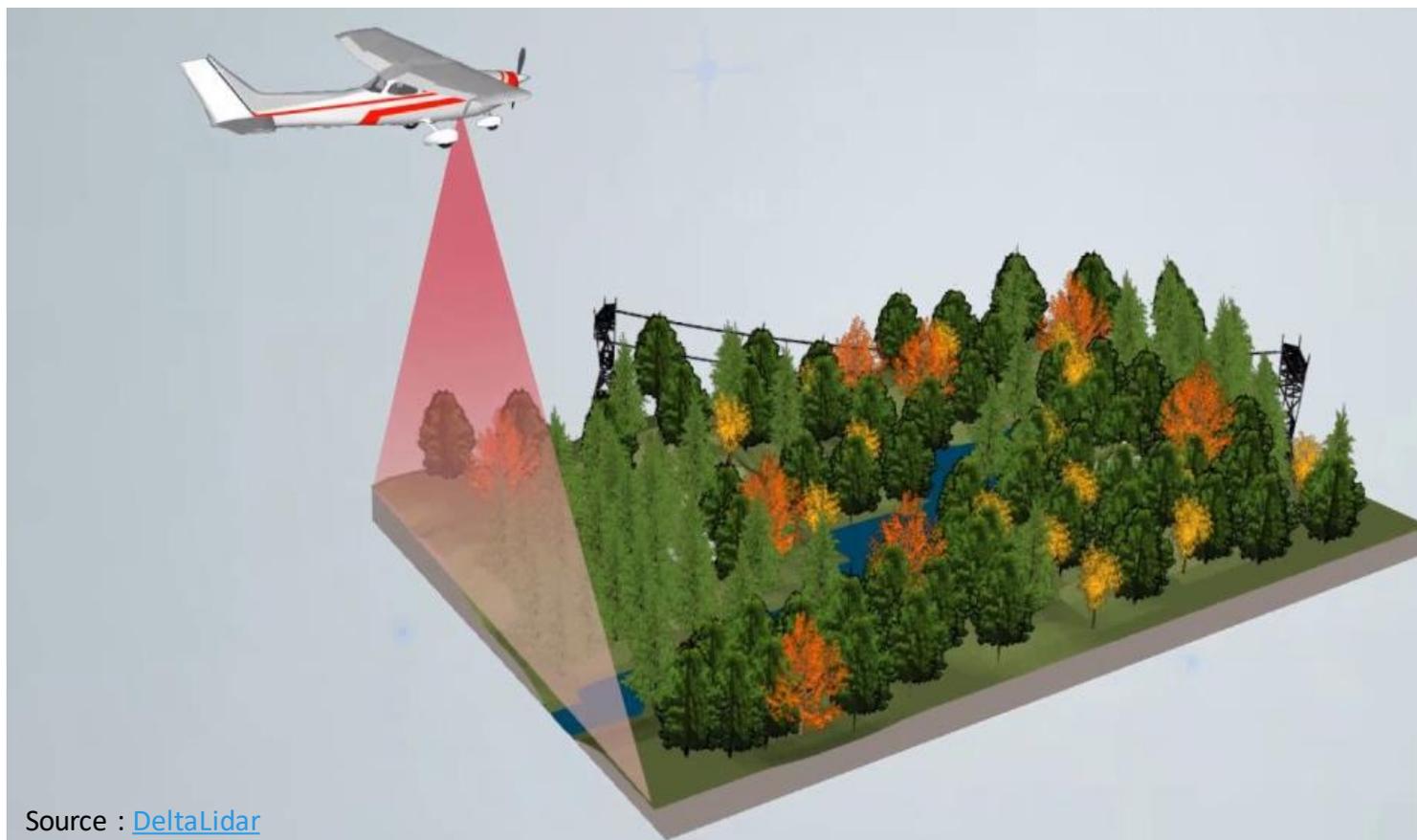


Source : [2]

Suivi du territoire

- Population canadienne inégalement répartie sur le territoire
- Grande quantité de **territoires non aménagés**
- Grande quantité de **forêts non entretenues**

Besoin de suivi de l'évolution du territoire



Source : [DeltaLidar](#)

Suivi du territoire

LiDAR aéroporté pour suivi des milieux forestiers :

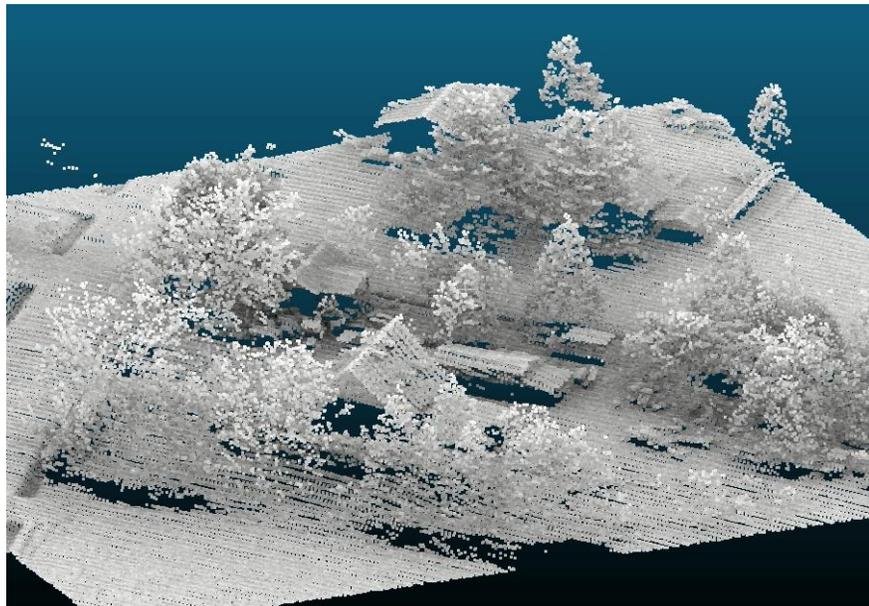
- Vecteur : ratio optimal entre couverture et résolution
- Capteur : pénètre la végétation et données informatives [Fassnacht et al., 2016]
- Multitude d'applications forestières



Besoin d'automatisation

Nuage de points LiDAR :

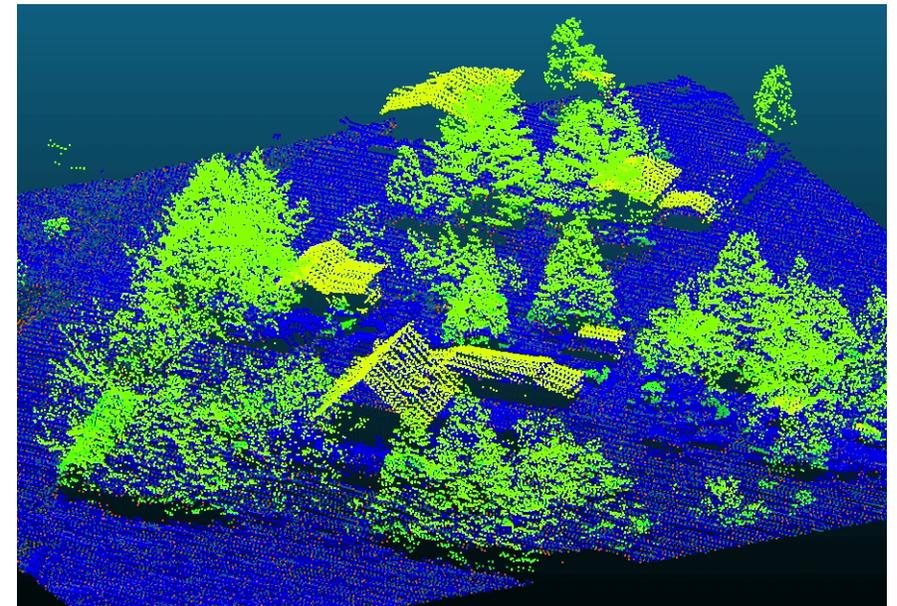
- Informations géométriques des *surfaces*
- Informatiquement *lourd*
- Non sémantisé



Sémantisation

Sémantisation :

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

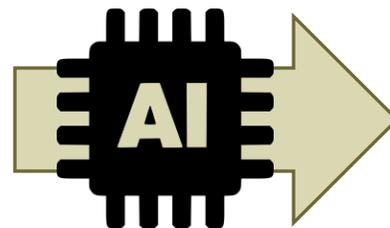
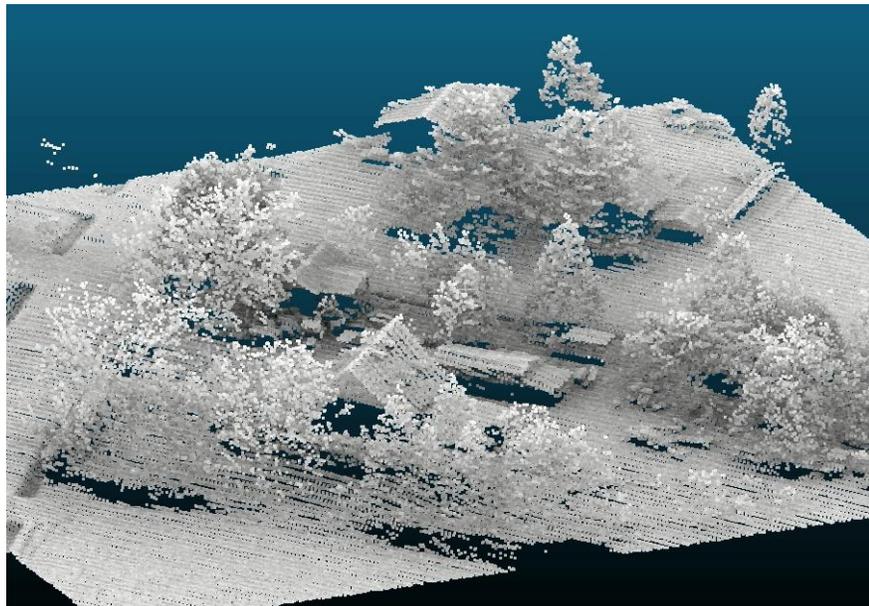




Besoin d'automatisation

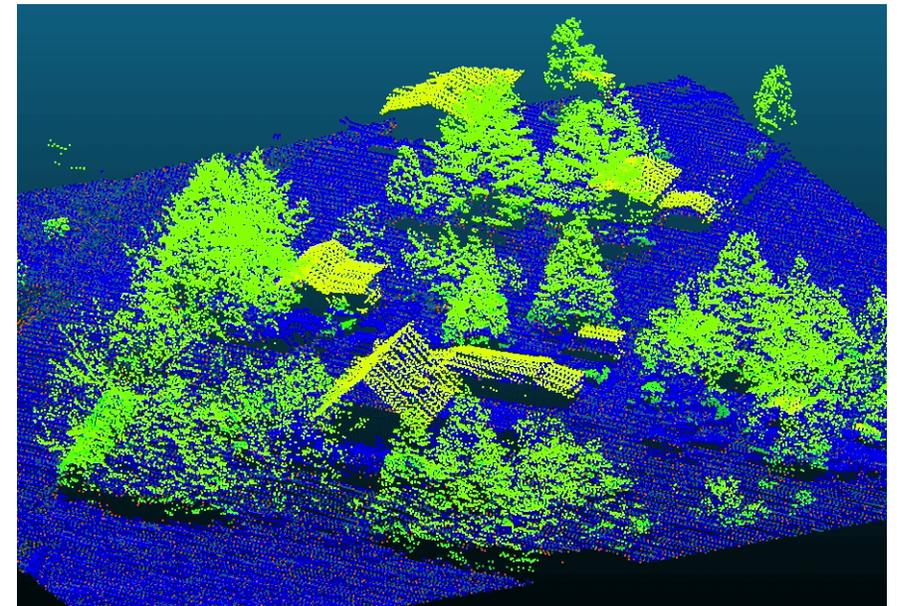
Nuage de points LiDAR :

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



Sémantisation :

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

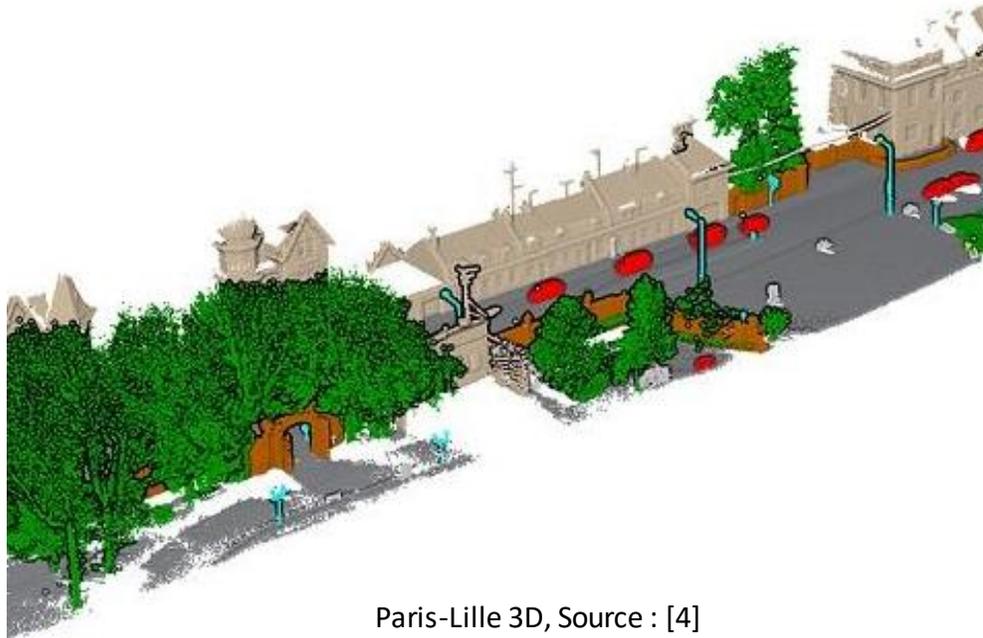




Problématique : manque de vérité terrain

Deep Learning sur nuage de points :

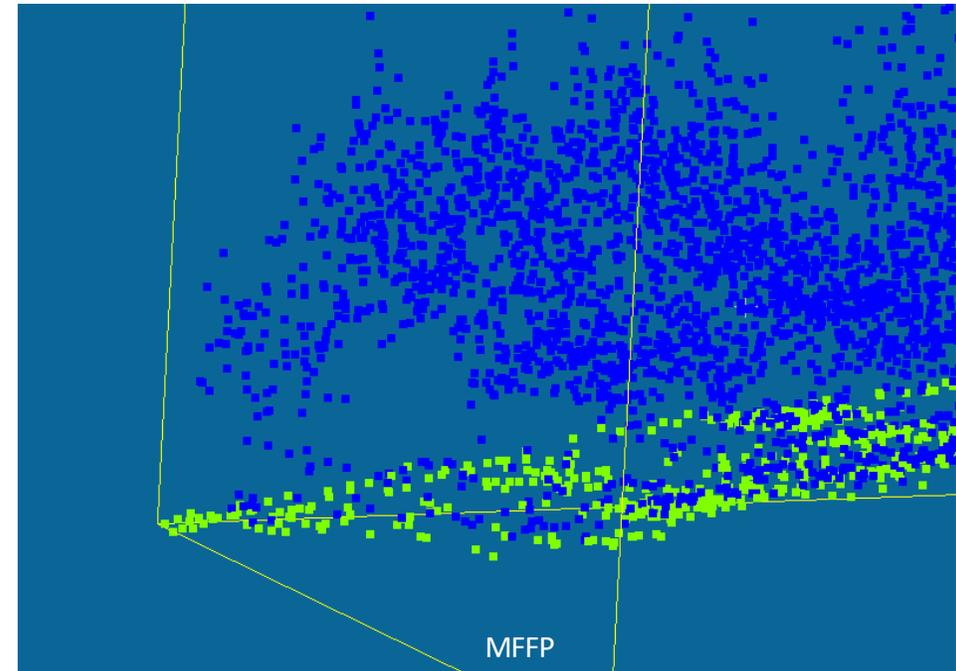
- Supérieur aux approches de ML classiques
- Nécessite grande quantité d'annotations



Paris-Lille 3D, Source : [4]

...en milieu forestier :

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





Solution envisageable

Simulation de vérité terrain :

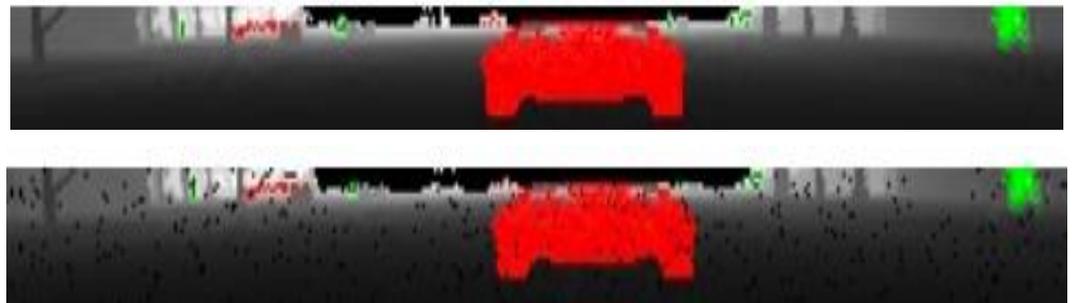
- [Wu et al., 2015] : Utilisé couramment
- [Dosovitskiy et al., 2015] : Transfert possible, même avec modélisation éloignée
- [Zhao et al., 2020b] : Simulation LiDAR



Source : [5]



Source : [6]



Source : [7]



Simulation pour le DL

Critères de la simulation :

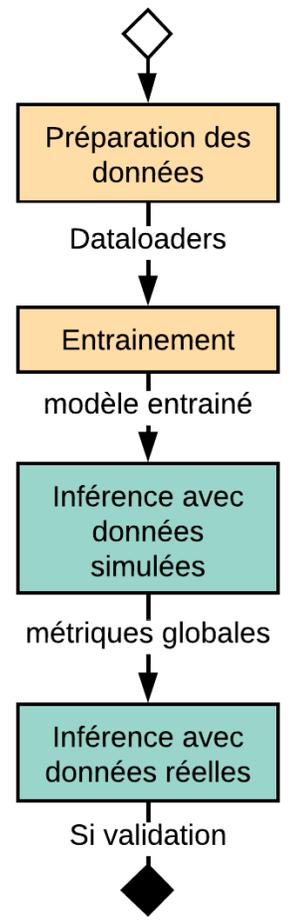
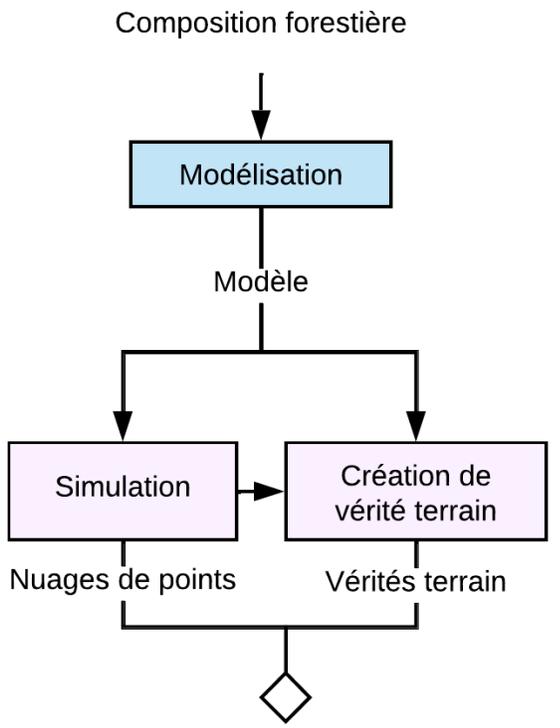
1. Réduction de l'écart entre distribution statistique simulée et réelle
2. Maximisation de l'informativité de la simulation



Source : Philippe Giguère

Axe de recherche

Correction du manque de données d'apprentissage par **simulation** de données **LiDAR ALS** pour l'**entraînement** de réseau de **DL**



Méthodologie

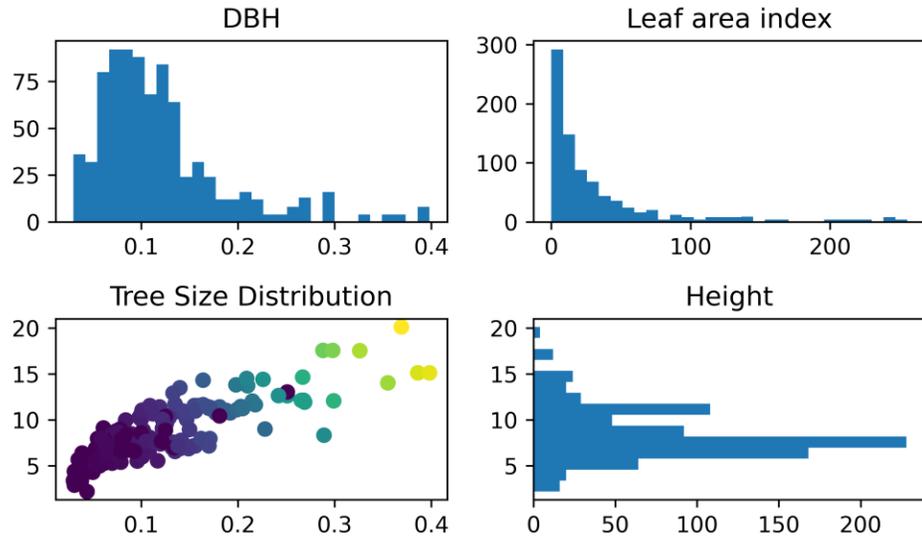
1. Modélisation
2. Simulation
3. Entraînement
4. Validation des modèles



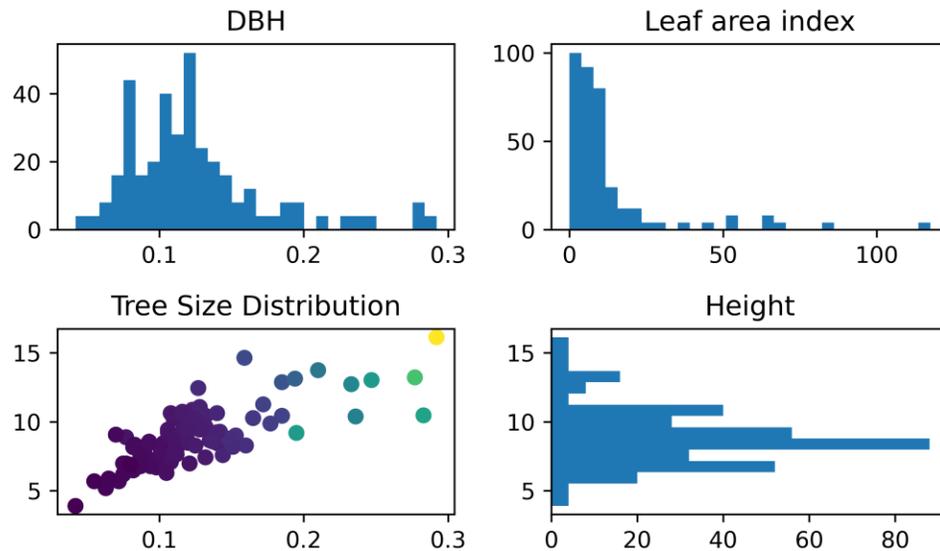
Modélisation

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

- 1197 arbres
- 827 feuillages non nuls



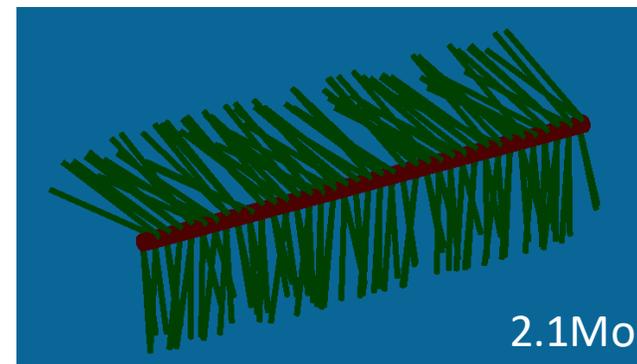
Modèles d'arbres

Origine :

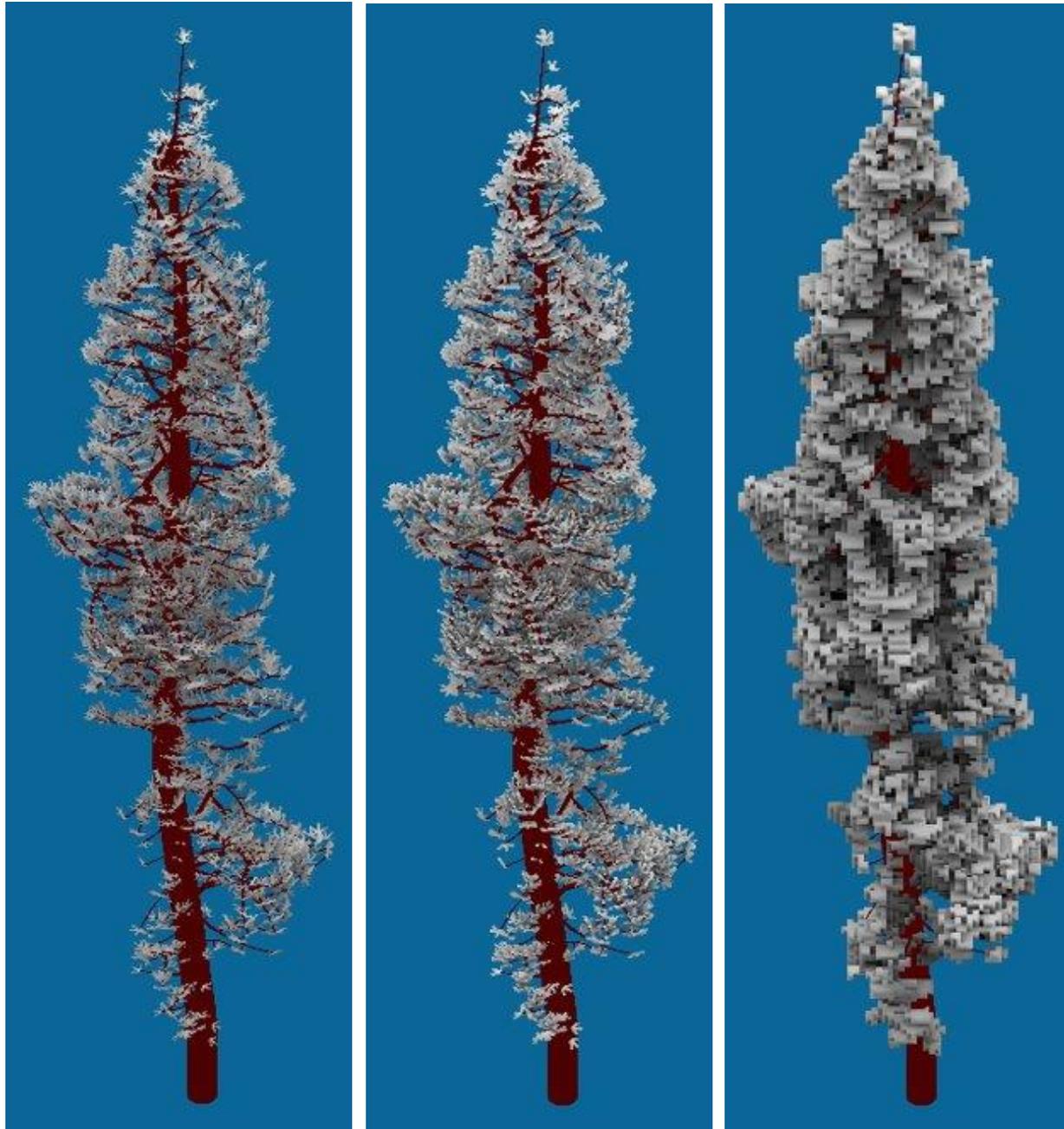
- Modélisation à partir de TLS
- Estimation du **feuillage** via **intensité**

Stockage :

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



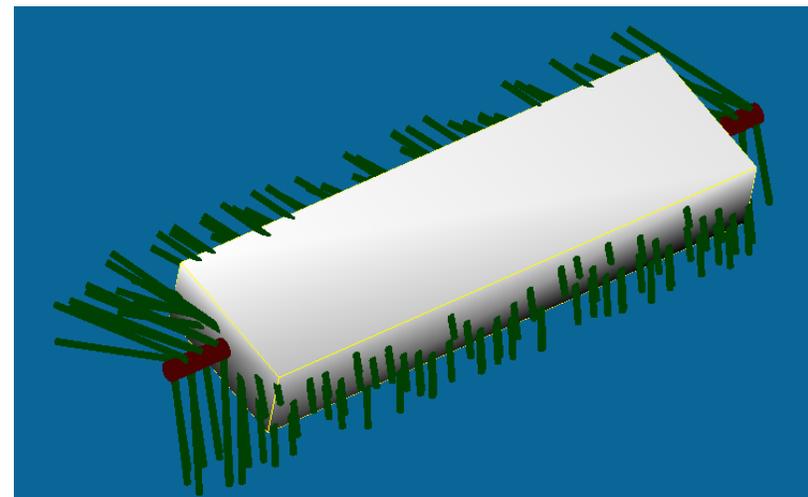
Modèles volumineux



Modèles d'arbres

Simplifications :

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

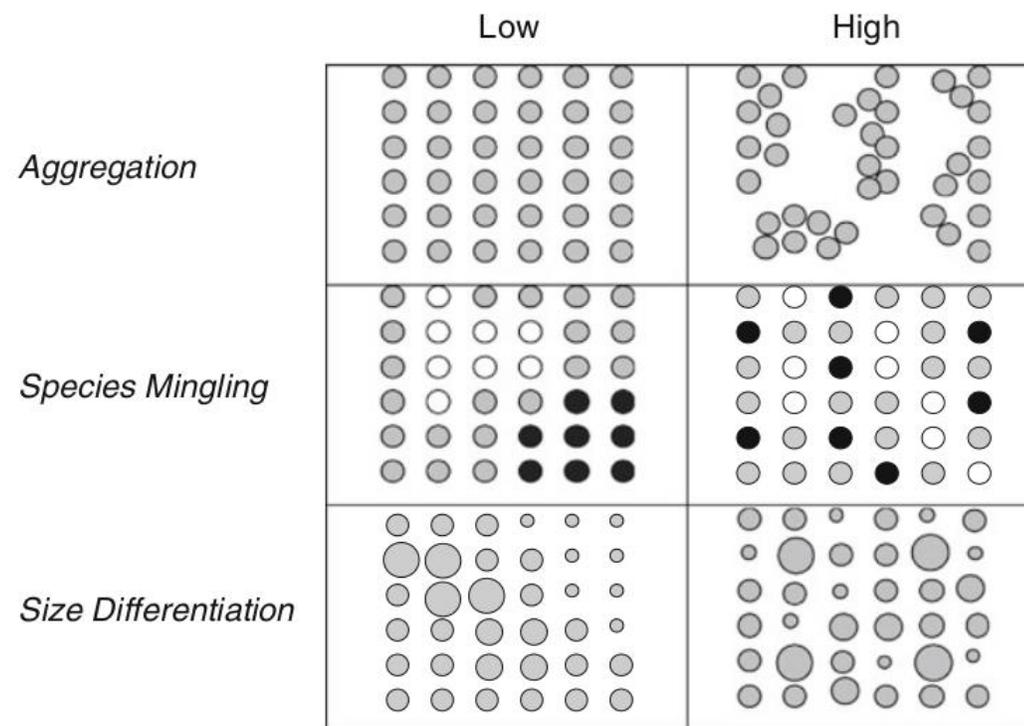
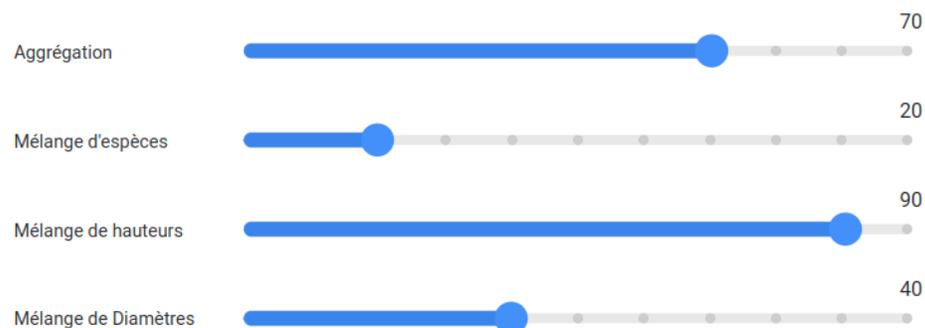




Modélisation : Structure spatiale

Descripteurs de structure spatiale :

- NNSS : Nearest Neighbors summary Statistics
- Processus ponctuels



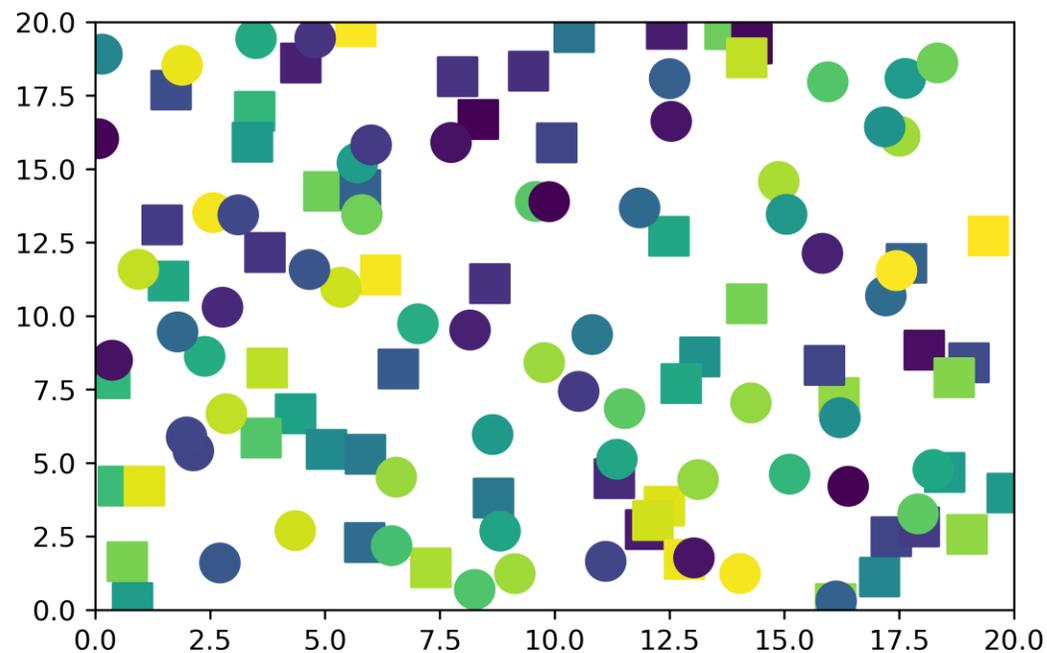
Source : [8]



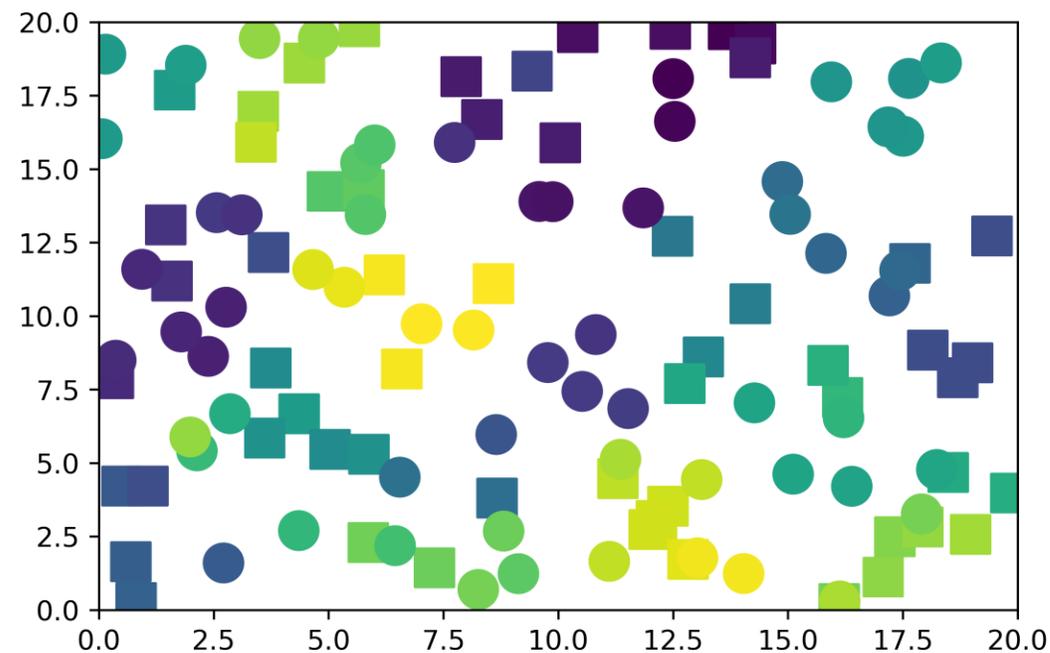
Modélisation : Structure spatiale

Implémentation de la méthode de Pommerenning et Stoyan 2008 (NNSS):

- Mélange de hauteurs



Aléatoire



Optimisé



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

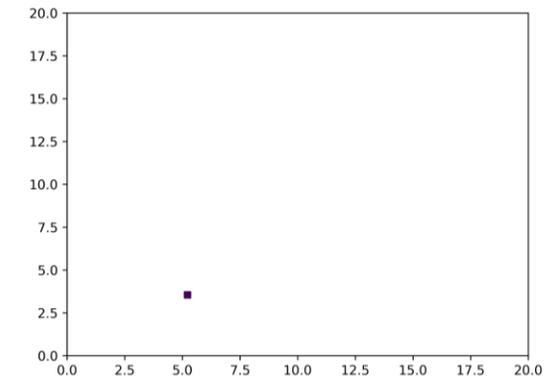


- Paramètre fixe :

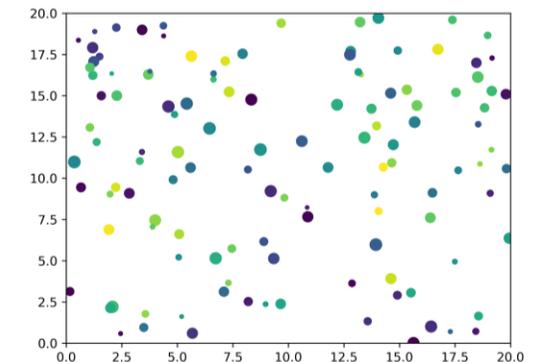
- Taille de placette : 20 m par 20 m

- Paramètres aléatoires :

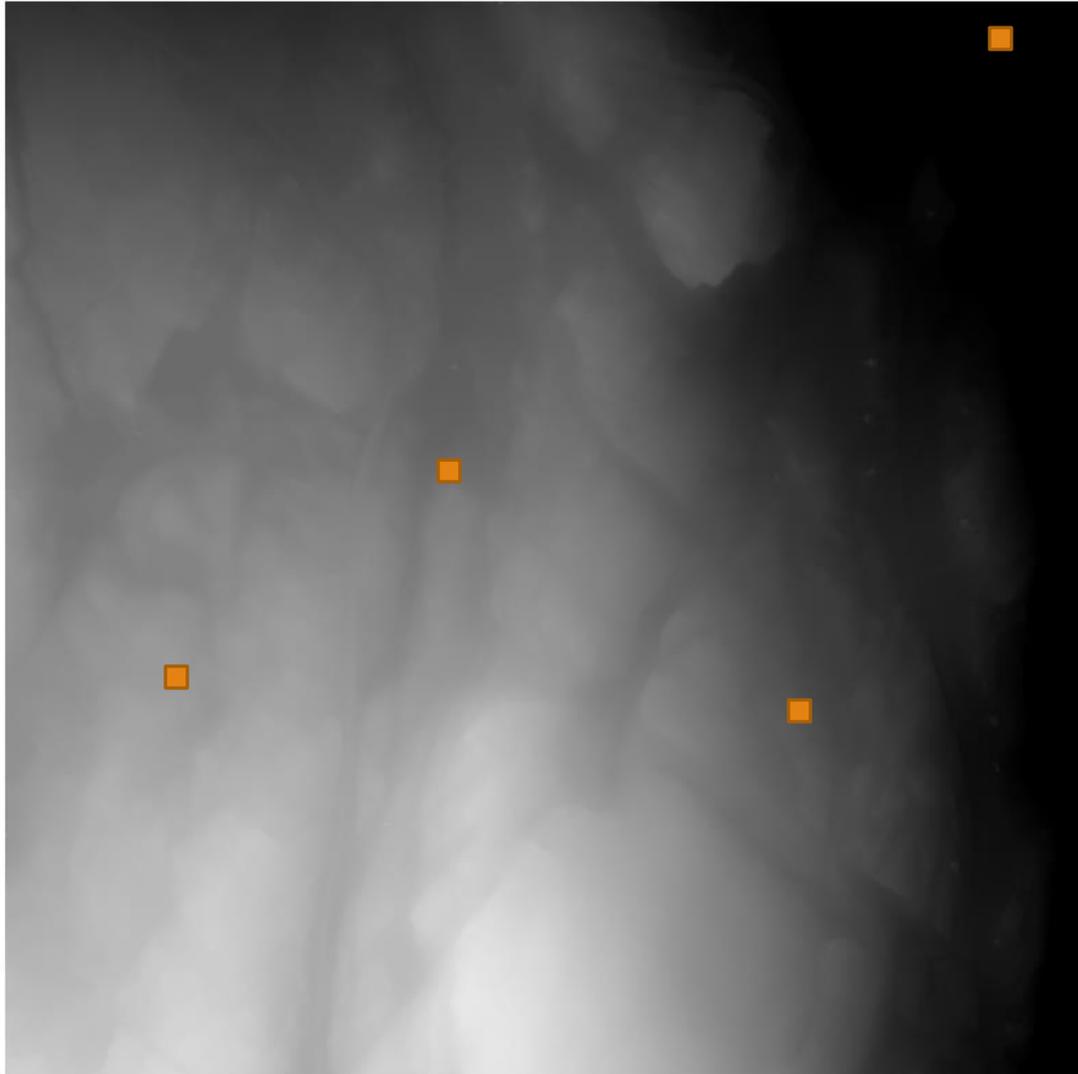
- Positionnement en X : uniforme de 0 à 20 m
- Positionnement en Y : uniforme de 0 à 20 m
- Hauteur : uniforme de 2 à 20 m
- DBH : uniforme de 0.03 à 0.43 cm



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. Simulation puissance de calcul
4. Jeu de données actuel



Choix de l'outil de simulation

HELIOS++
3DGEO HEIDELBERG

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 :

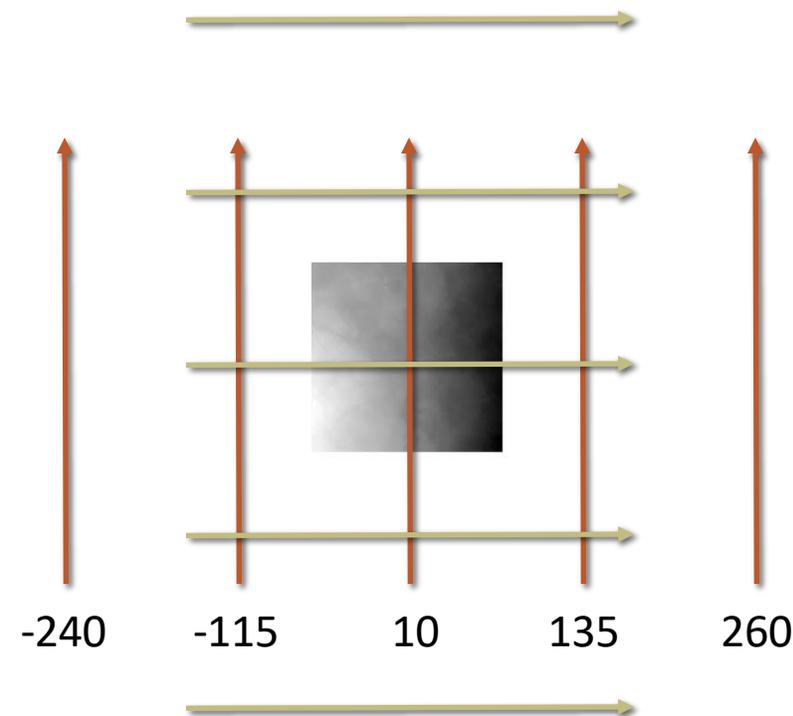
- Fréquence de pulsation : 500 000 Hz
- Angle de scan max 15 deg
- Fréquence de balayage : 100 Hz

Paramètres du plan de vol :

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

Paramètres de précision :

- Précision globale : 0 m





Traitement de la simulation

Objectif de la simulation :

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

Nombre de placettes requises:

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

675 millions de points

**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



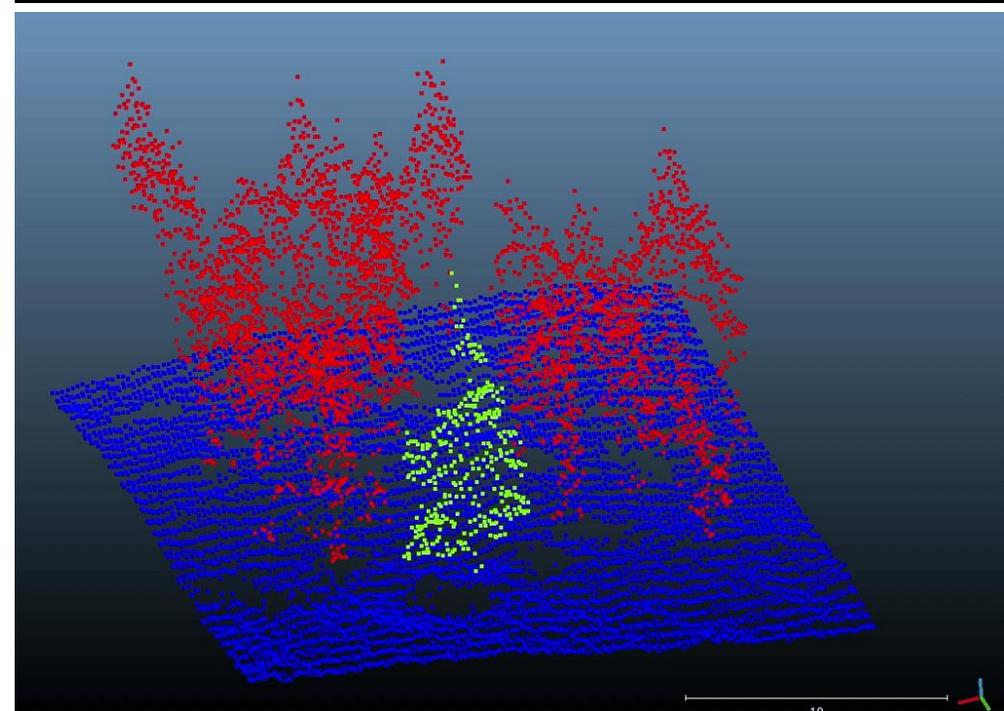
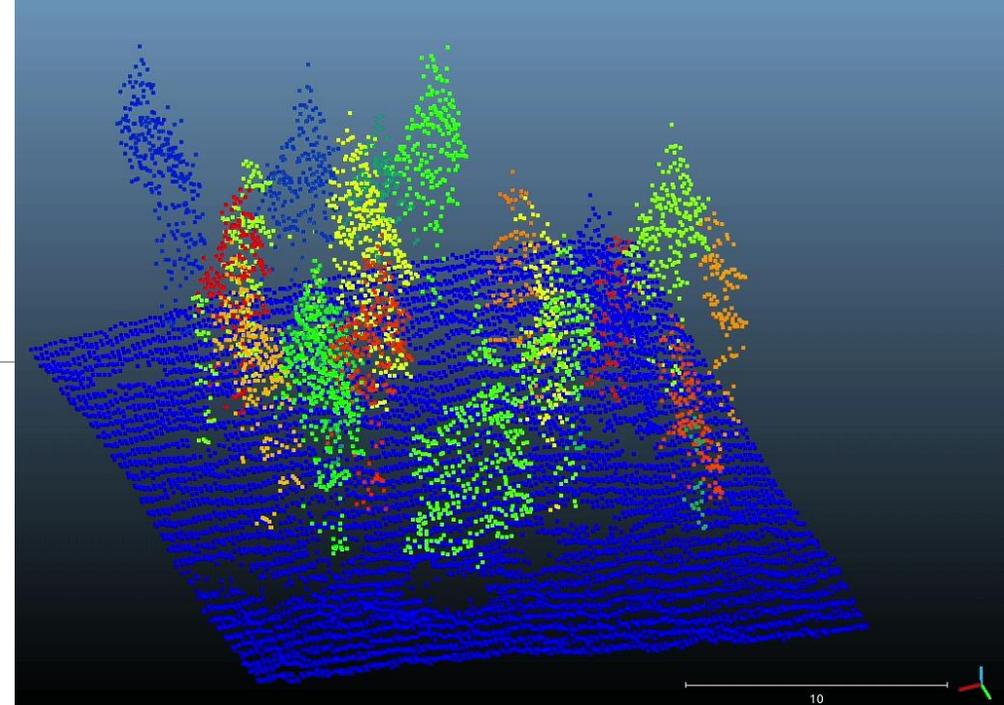
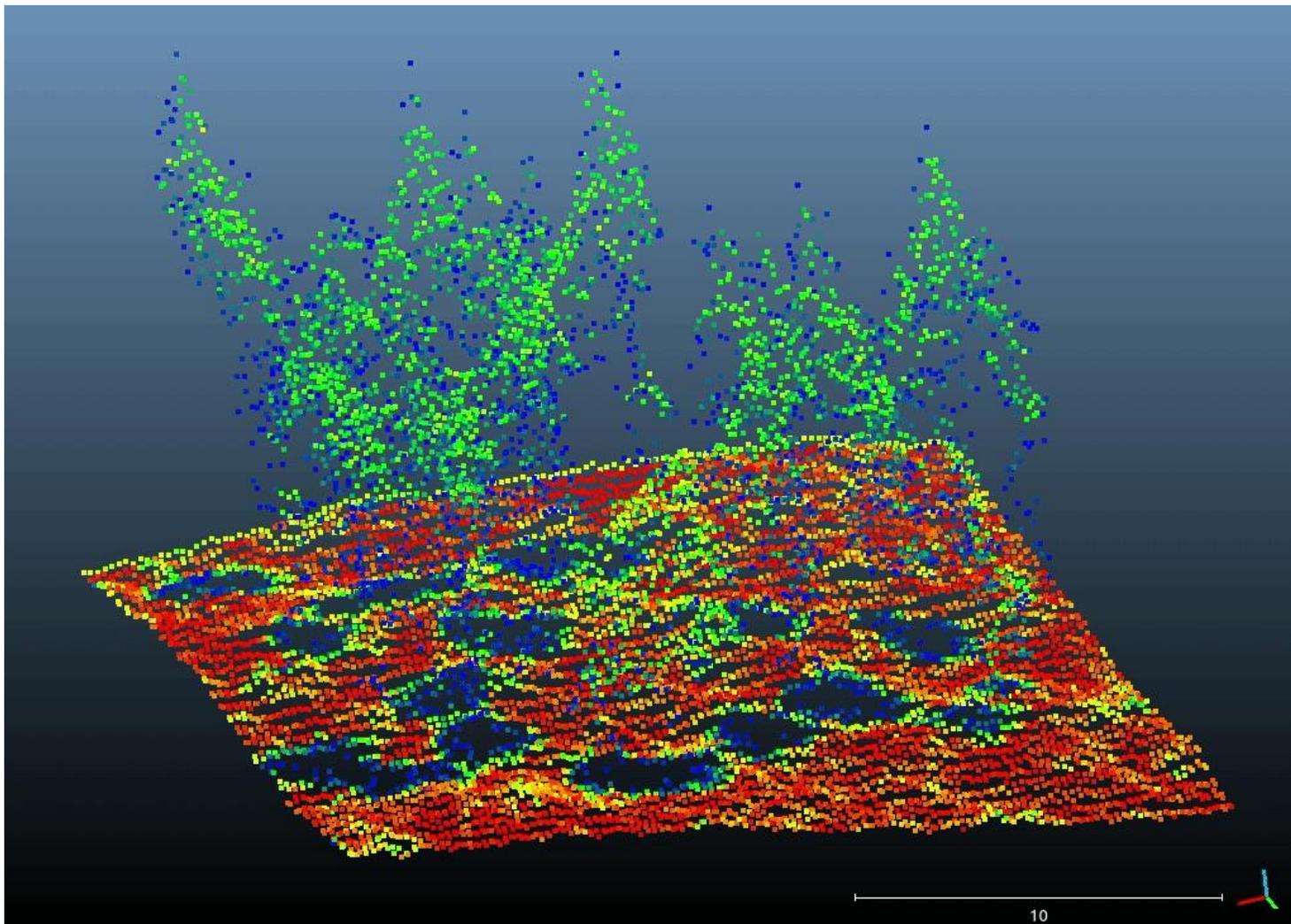
compute | **calcul**
canada | canada

109 Jours de calculs

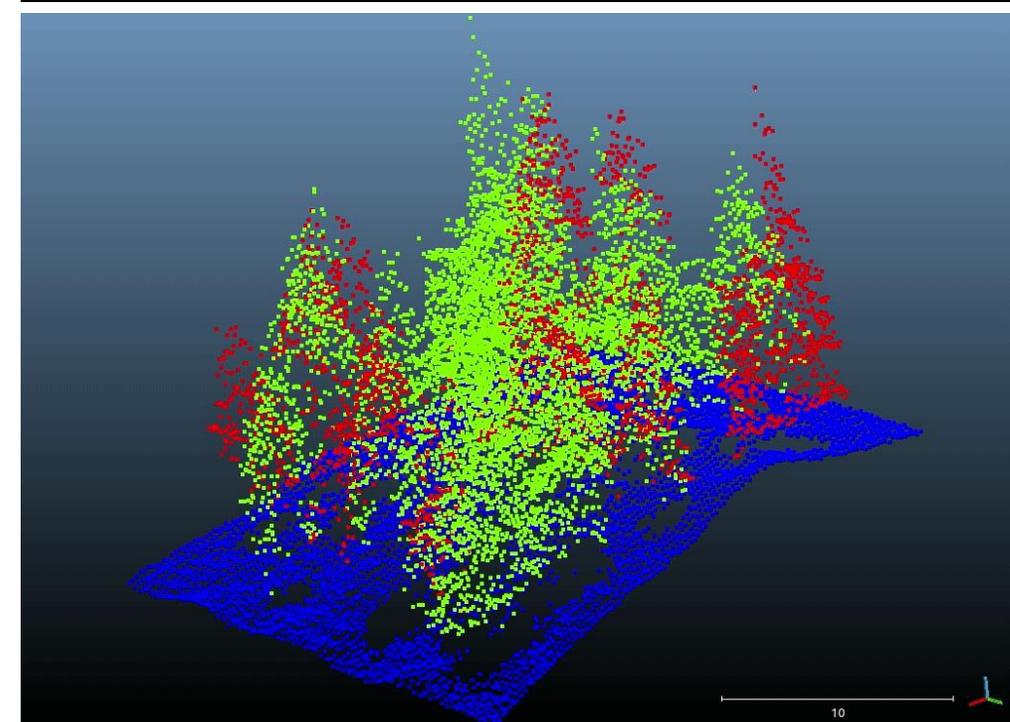
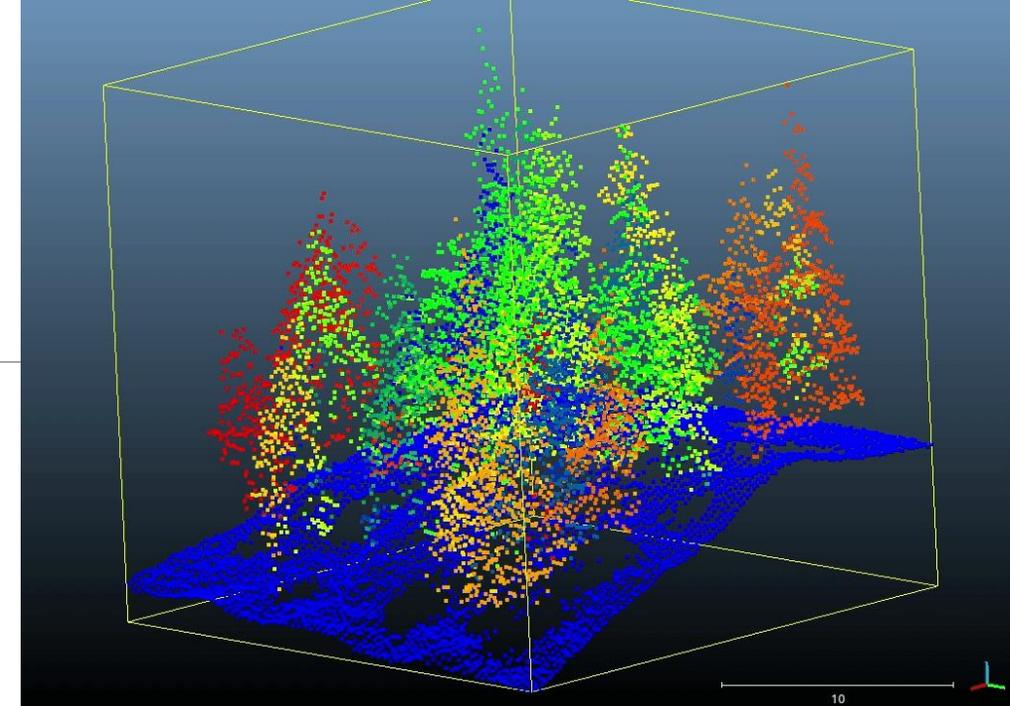
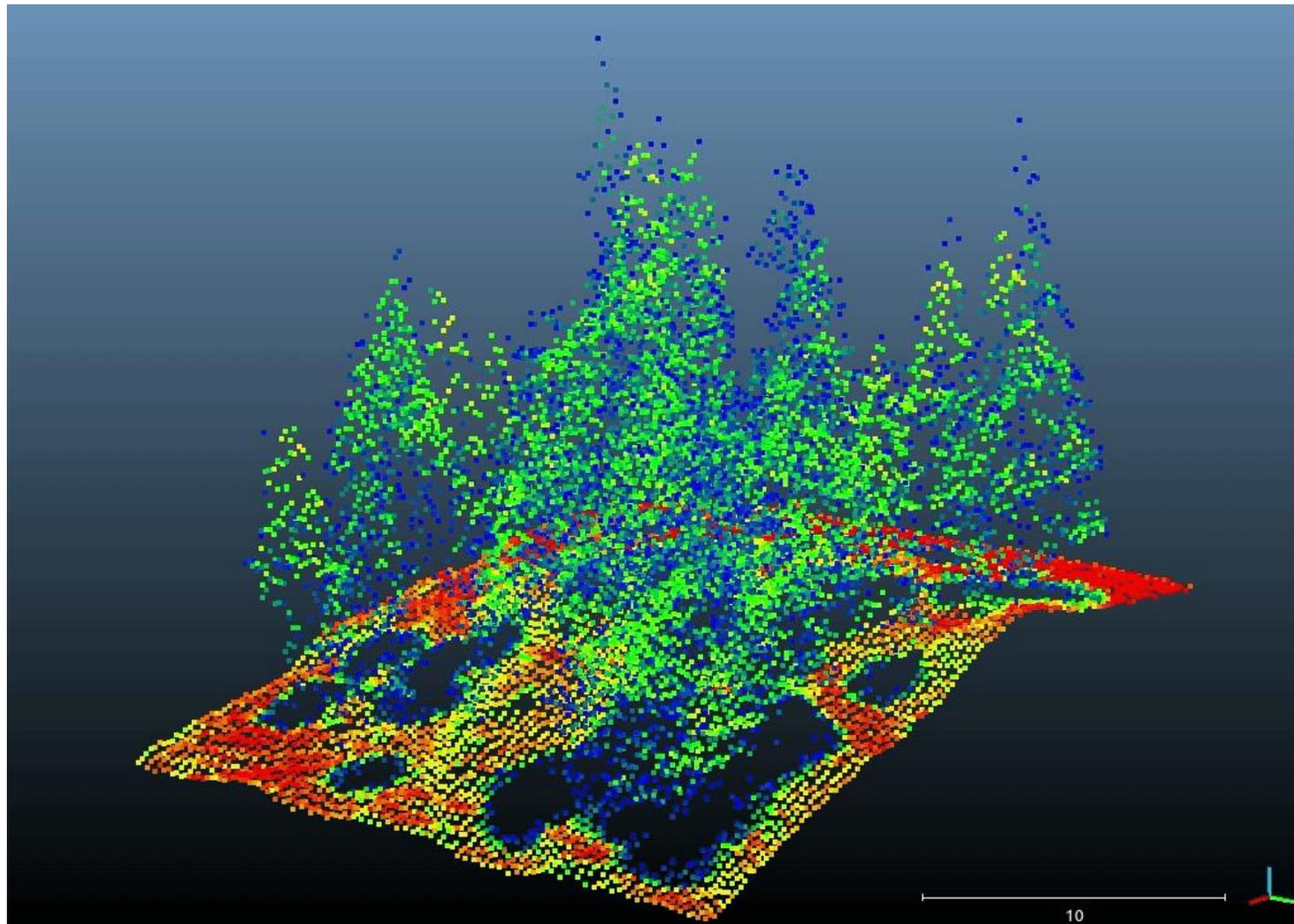


3h de calculs

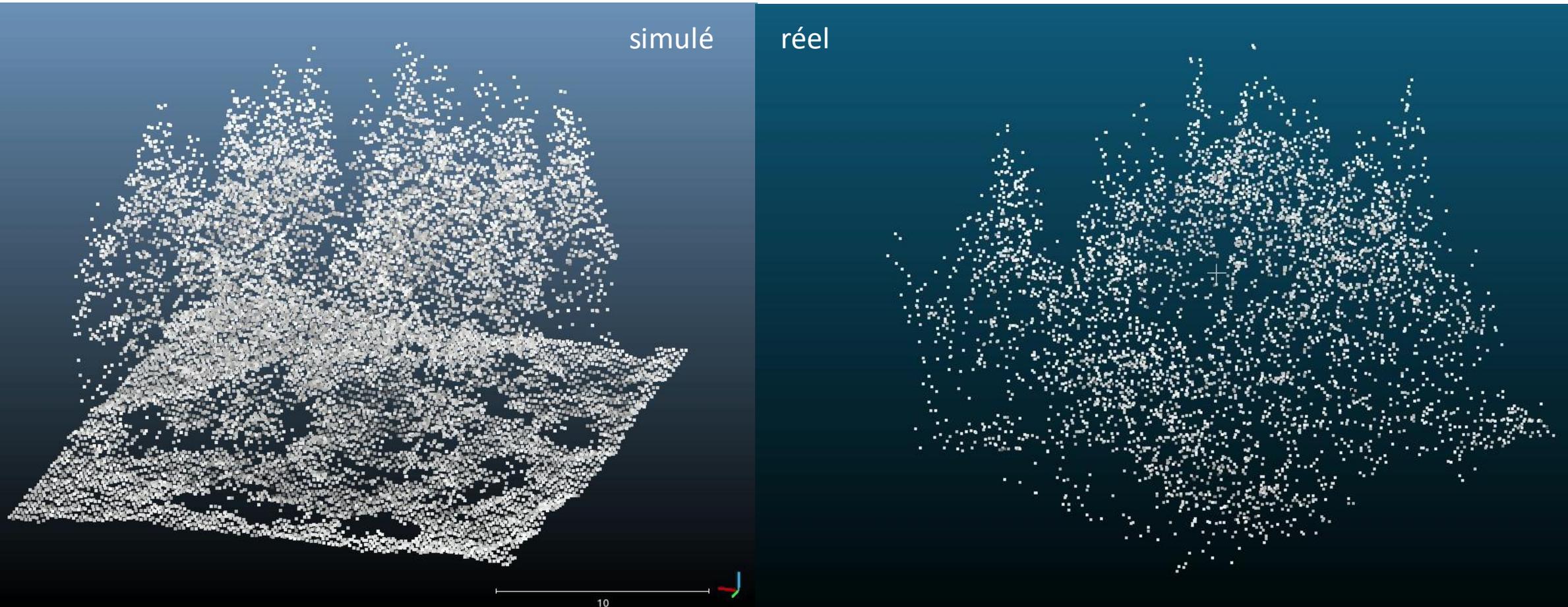
Jeu de données simulées



Jeu de données simulées

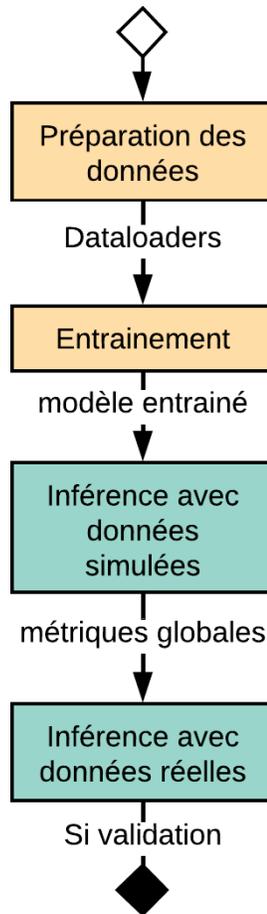


Jeu de données simulées





Axe 1 : entraînement et validation des modèles



Entraînement :

- PointNet++ [11]
- KPConv [12]
- Point Transformer [13] : *Etat de l'art*

Validation :

- Sur données **simulées** : Métriques globales et analyses visuelles
- Sur données **réelles** : Analyses visuelles



Perspectives : Vue générale

Axe 1 : Validation

Modélisation forêt simple
Création de vérité terrain par simulation
Entraînement réseau de segmentation sémantique
Validation sur données réelles

Axe 2 : Compréhension

Étude de sensibilité des paramètres :

- Modélisation
- Simulation

Entraînement de réseaux :

- Segmentation d'instances
- Segmentation panoptique

Axe 3 : Généralisation

Enrichissement nomenclature
Création benchmark
Cas forêt tempérée
Cas forêt tropicale



Retombées du projet

Premiers travaux de simulation LiDAR ALS pour la création de vérité terrain en milieu forestier

Mise à disposition d'un **benchmark** => **Stimulation recherche en DL** pour le milieu forestier

Recommandations de méthodologies d'acquisitions pour différents organismes et entreprises

Merci de votre attention

- [1] Ogle, S. M., Domke, G., Kurz, W. A., Rocha, M. T., Huffman, T., Swan, A., ... & Krug, T. (2018). Delineating managed land for reporting national greenhouse gas emissions and removals to the United Nations framework convention on climate change. *Carbon balance and management*, 13(1), 1-13.
- [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., Esmorís 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] Qi, C. R., Yi, L., Su, H., & Guibas, L. J. (2017). Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on pointsets in a metric space. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [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.

<https://polarsensing.net/>

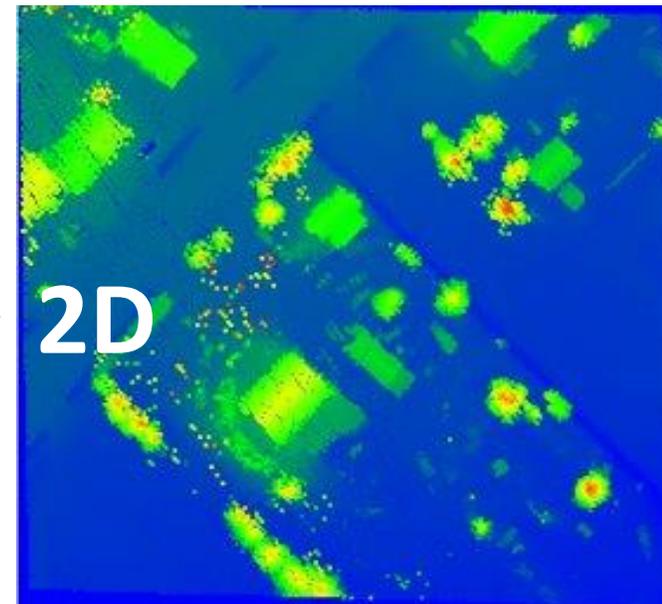
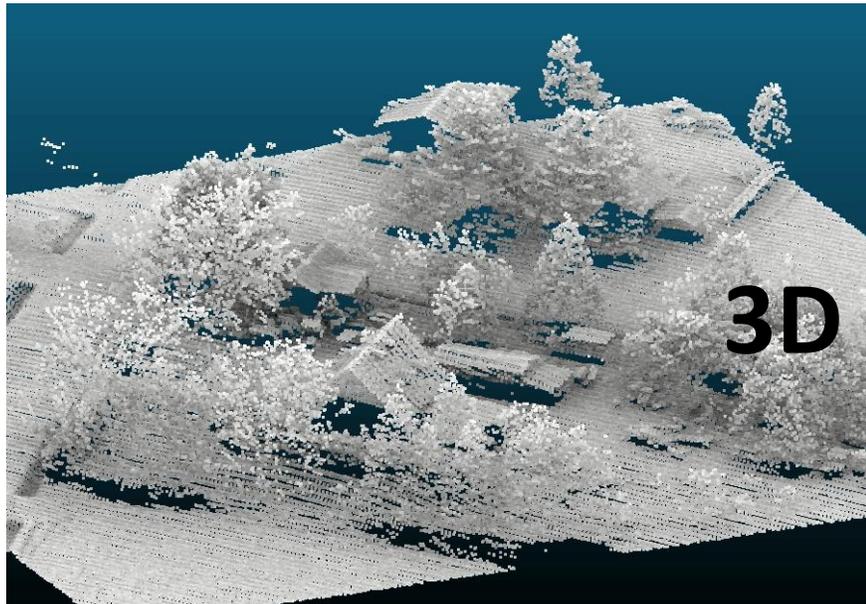
Problématique : perte de l'information géométrique

Nuage de points LiDAR :

- Rastérisation systématique

[Fassnacht et al., 2016] et [Shi et al., 2018c] :

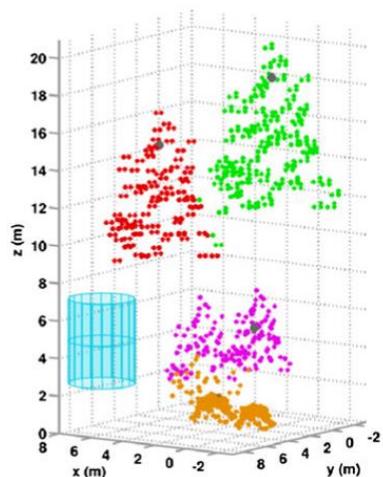
- Information géométrique **utile** pour applications forestières



Information géométrique sous-exploitée

Simulation LiDAR

Méthodologies :



[Ferraz et al., 2012]



[Côté et al., 2012]



[Winwarter et al., 2021,
Gastellu-Etchegorry et al., 2016]

Modélisation :

- A l'échelle de la parcelle :
 - Copie de distributions mathématiques
 - Copie d'inventaires forestiers

- A l'échelle de l'arbre :
 - [Fassnacht et al., 2016] : Géométrie importante

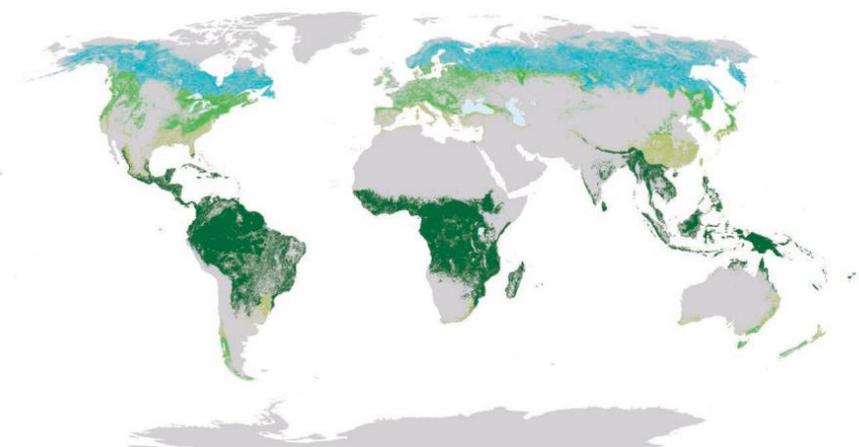
Nom	Fournisseur	Milieu	Type d'acquisition			Quantité de donnée
			LiDAR	RGB	Hyperspectral	
NEON Tree Evaluation	NEON	Forestier	14 pts/m ²	10cm	1m	Faible
G-LiHT Data Center	NASA	Forestier	7 pts/m ²	10-25cm	1m	Grande
MFFP	MFFP	Forestier	1 à 8 pts/m ²	x	x	Grande
Québec	donneesquebec	Urbain	8 pts/m ²	25cm	x	Grande
3D Semantic Labelling Contest	ISPRS	Urbain	4 pts/m ²	x	x	Faible
GRSS Data Fusion Challenge	IEEE	Urbain	50cm (MNT)	5cm	1m	Faible
LASDU	Université de Munich	Urbain	4 pts/m ²	x	x	Faible
DublinCity	V-SENSE	Urbain	348 pts/m ²	3.4cm	x	Moyenne
DALES	Université de Dayton	Urbain	50 pts/m ²	x	x	Moyenne

TABLE 2.1 – Liste des jeux de données disponibles pour les scans **LiDAR** aéroportés

Nom	Classes de végétation	Qualité de la classification
NEON Benchmark	Instances d'arbres	Moyenne
G-LiHT Data Center	Non-sol	Moyenne
MFFP	Non-sol	Basse
Québec	Végétation haute, Végétation basse	Moyenne
3D Semantic Labeling Contest	Végétation basse, Haies, Arbustes, Arbres	Bonne
GRSS Data Fusion Challenge	Herbe verte, Herbe sèche, Conifères, Feuillus, Gazon	Bonne
LASDU	Végétation basse, Arbres	Bonne
DublinCity	Instances d'arbres	Bonne
DALES	Arbres, Arbustes, Haies, Buissons	Bonne

TABLE 2.2 – Vérité terrain fournie selon les jeux de données du tableau 2.1

Définition de la forêt



Répartition des 4 grands types de forêt sur le globe, FAO 2020

Conflits sur la définition :

- Définitions différentes selon domaines et régions
- Réalité continue ≠ Classification discrète

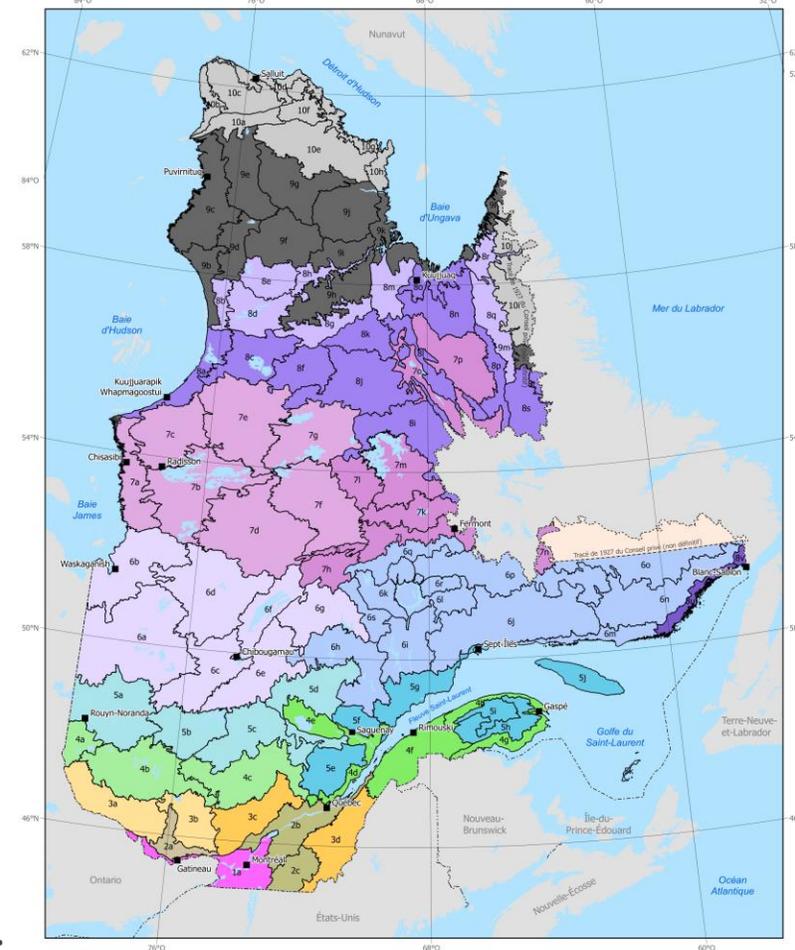
Au Canada

- Ministère RNCan gère ressources forestière avec 3 projets :
 - Inventaire Forestier National
 - Classification Canadienne Ecosystèmes forestiers
 - Canadian National Vegetation Classification
- Maillage du territoire

Au Québec

- Ministère Forêt Faune Parcs avec :
 - Système de classification écologique du Québec
 - Inventaires écologiques

Zones de végétation, domaines bioclimatiques et régions écologiques



Légende

- Frontière internationale
- Frontière interprovinciale
- Frontière Québec-Terre-Neuve-et-Labrador (cette frontière n'est pas définie)
- Frontière internationale
- Frontière interprovinciale
- Frontière Québec-Terre-Neuve-et-Labrador (cette frontière n'est pas définie)
- Frontière internationale
- Frontière interprovinciale
- Frontière Québec-Terre-Neuve-et-Labrador (cette frontière n'est pas définie)

Projection cartographique

Conique de Lambert avec deux parallèles d'échelle conservée (46° et 60°)
0 100 200 km

Source

Données : Frontières et classification écologique
Organisme : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
Année : 2021
Réalisation et diffusion : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers
Note : Le présent document n'a aucune portée légale.
© Gouvernement du Québec, 2^e trimestre 2021

Urbains	# Annotation (millions)	classes
Québec	13000	Végétation haute, Végétation basse
ISPRS	1.2	Végétation basse, Haies, Arbustes, Arbres
DublinCity	260	Arbres, Herbe
LASDU	3.2	Végétation basse, Arbres
Hess3D	73	Végétation basse, Arbres, Arbustes
IEEE GRSS	2	Herbe verte, Herbe sèche, Conifères, Feuillus, Gazon
DALES	492	Végétation, Arbres, Arbustes, Haies, Buissons
Forestiers	# Annotation (millions)	classes
MFFP	1000	Non-sol
G-LiHT	1000	Non-sol
NEON	0.03	Arbres
[Kalinicheva et al. 2021]	0.2	Strate inférieure, Strate moyenne, Strate supérieure
[Krisanski et al. 2021]	-	Végétation, Structure ligneuse, Bois mort
[Windrim et al. 2020]	-	Tronc, Branchages, Feuillage, Arbres

Absence de données d'apprentissage pour le milieu forestier

Question de recherche

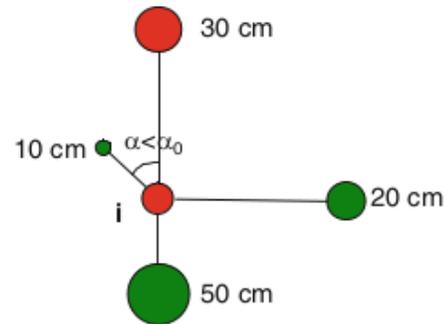
Comment résoudre le **manque de données d'apprentissage** en **milieu forestier** pour l'amélioration de l'exploitation, par les **algorithmes de DL**, de la **donnée géométrique** contenue dans les **nuages de points ALS** ?

Descripteurs de la forêt

Structure

Relevé terrain

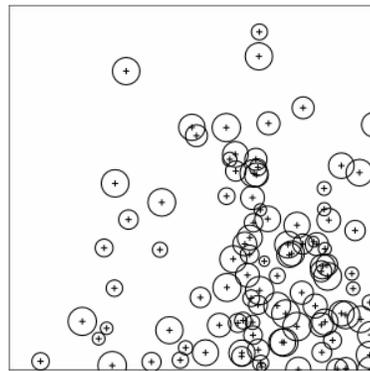
- Analyse relative
- Métriques simples



Méthode de relevé terrain, Klaus von Gadow, 2012

Regard mathématique

- Forêt et arbre = Point process :
- Fonction K de Ripley
- Fonction L Besag
- Kernel Density estimation
- Analyse Globale

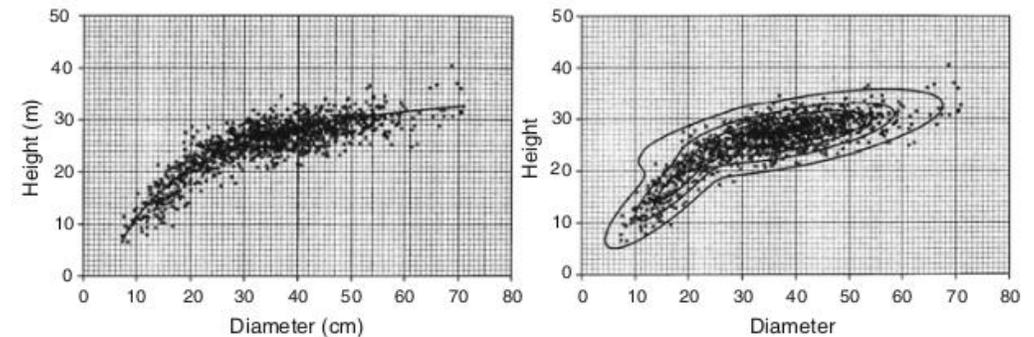


Process de Poisson hétérogène, Guillaume Perrin, 2006

Allométrie

Variabilité au sein d'une espèce

- Bases de données :
- Traits des plantes au Canada (TOPIC)
- TRY
- Courbes descriptives

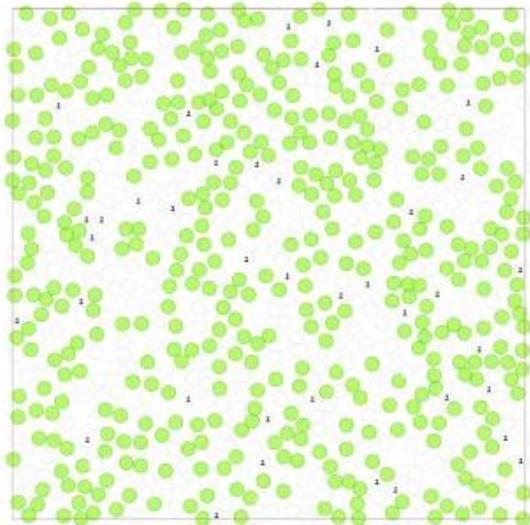


Courbes allométriques de la hauteur en fonction du DHP, Klaus von Gadow, 2012

Méthodes de modélisation

Méthodes mathématiques

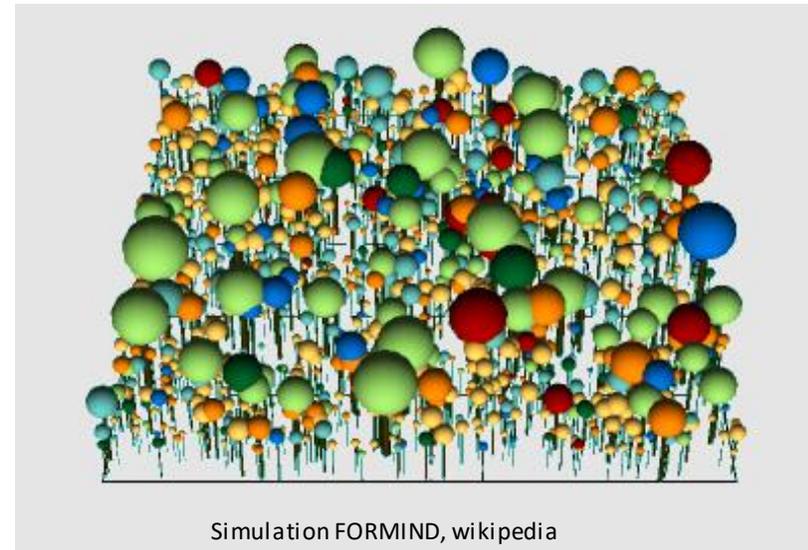
- Automate cellulaire
- Inversion de métriques relatives
- Réorganisation à partir d'un CSR



Automate cellulaire, Joseph Claghorn, 2015

Logiciels de simulation de Pousse

- FORMIND
- SILVA
- SORTIE-ND
- TASS

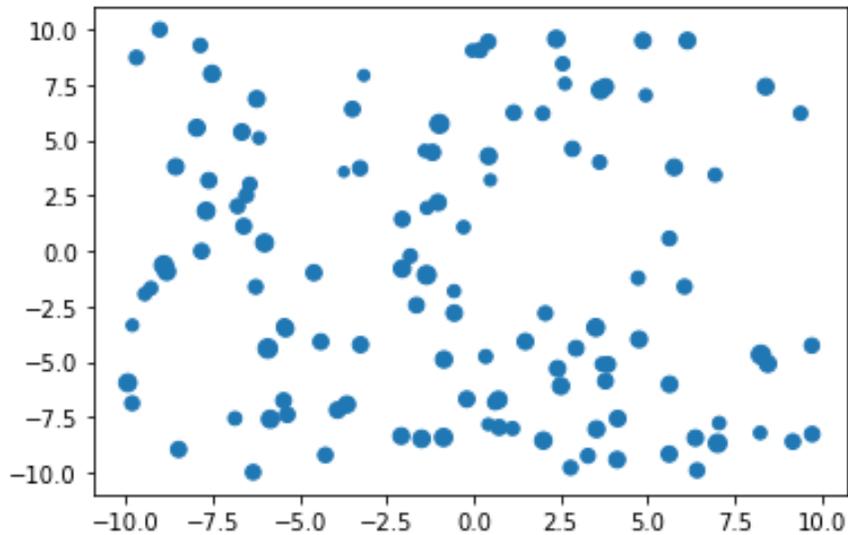
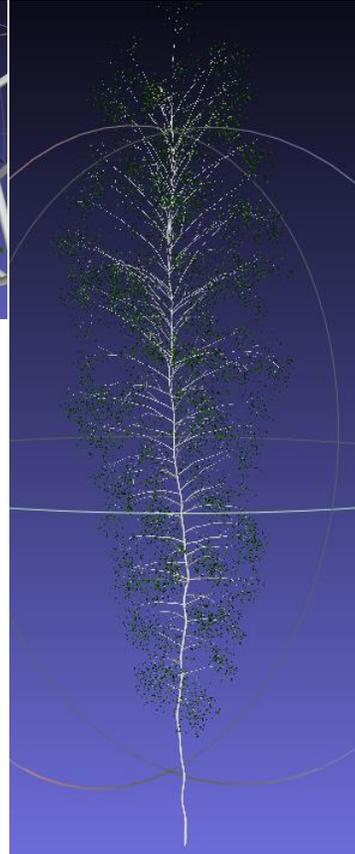


Simulation FORMIND, wikipedia

Modélisation

Structure

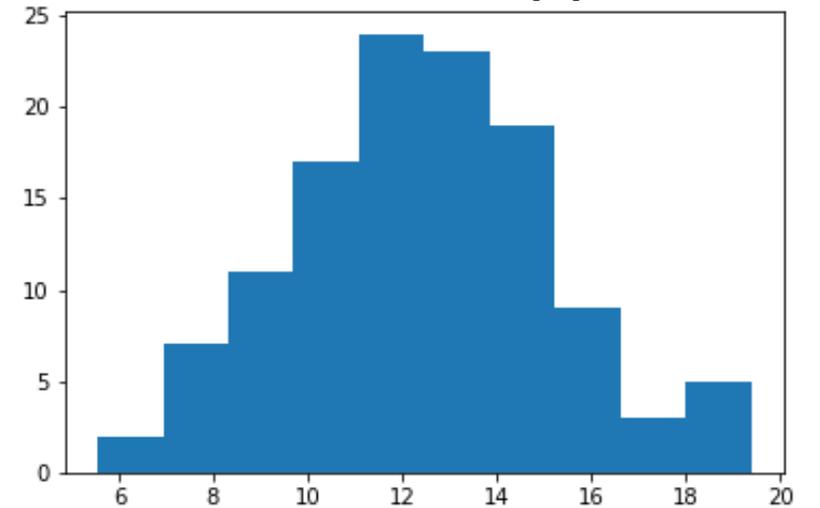
- Placement aléatoire
- Densité : 0.3 arbres/m²
- 1 seule espèce : Bouleau

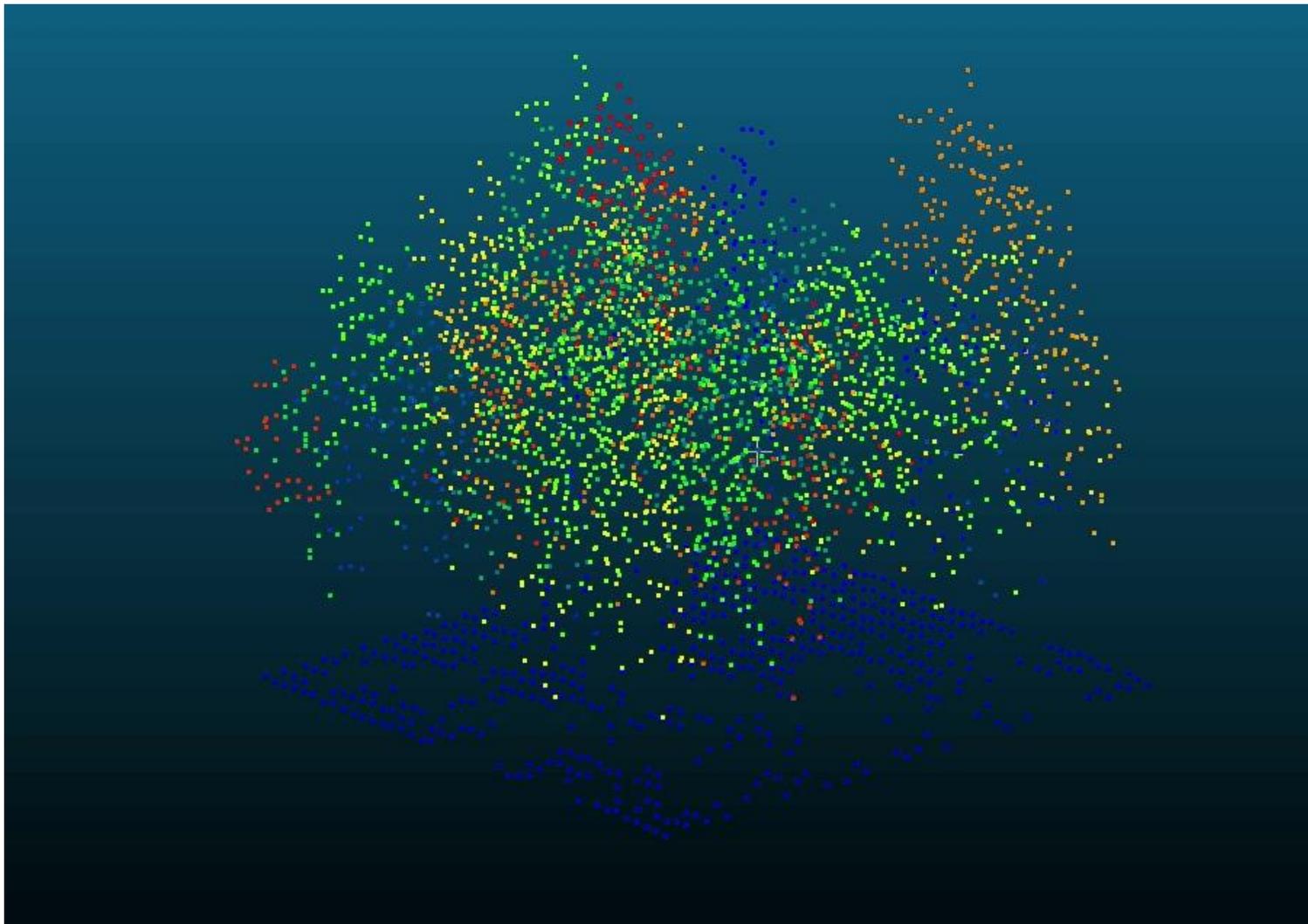


Répartition spatiale des arbres sur la placette de 400m²

Allométrie

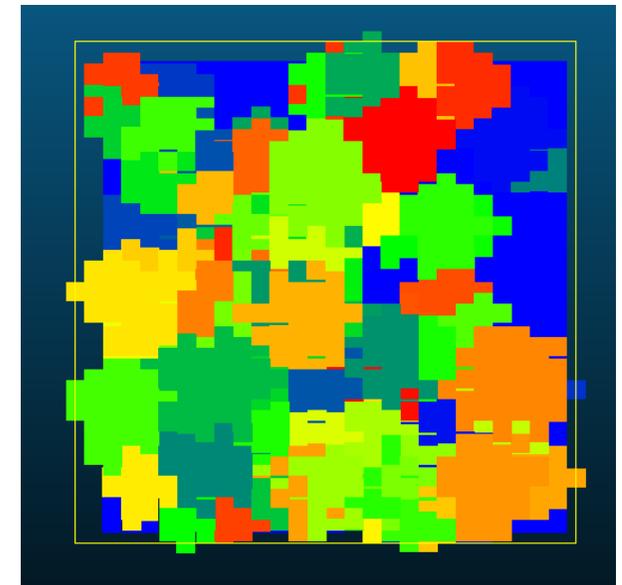
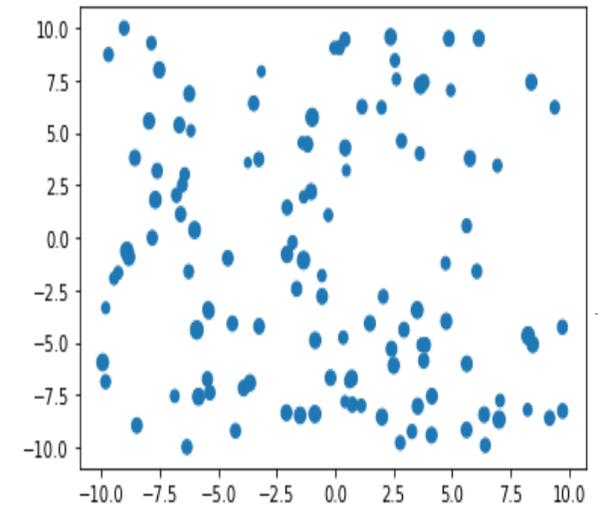
Répartition statistique de la hauteur des arbres [m]





Résultats du scan :

- Densité : 8.84 pts/m² (3536 points)



Comparaison de la vue au nadir
entre scan et modélisation

Problématiques actuelles

Qualité de l'information spectrale

- Comparaison gamme intensité de retour
- Conversion en attributs spectraux :
 - Couleurs ambiante, diffuse et spéculaire
 - Reflets spéculaire
 - Densité optique
 - Facteur de dissolution
 - Modèle d'illumination

```
newmtl Wood
Ka 1.000000 1.000000 1.000000
Kd 0.640000 0.640000 0.640000
Ks 0.500000 0.500000 0.500000
Ns 96.078431
Ni 1.000000
d 1.000000
illum 0
map_Kd woodtexture.jpg
```

Qualité de l'information géométrique

- Hovi et al 2016 : 65% de la variance des métriques issues des waveform provient de la forme de l'arbre
- Qualité des modèles 3D ?



Situation idéale



Situation de compétition

Betula papyrifera

Axe 2 : Études de sensibilité

Paramètres de modélisation :

- Variété des modèles d'arbres
- Variété de la distribution statistique des tailles des arbres
- Présence/absence du sous-bois
- Qualité de la modélisation du sol

Paramètres de simulation :

- Quantité de données nécessaire
- Tailles des placettes
- Densité d'acquisition
- Angle de scan et nombre de points de vue

Axe 2 : Entraînement approfondi

Segmentation sémantique

- Introduction de régularisations
- Comparaison d'algorithmes :
 - *PointNet++*
 - *KPConv*
 - *RandLA-Net*
 - *Point Transformer*
- Validation sur benchmark urbains

Segmentation d'instance

- Comparaison d'algorithmes :
 - *PointPillars*
 - *Part-A2-Net*
- Validation sur benchmark *NEON*

Segmentation panoptique

- Comparaison d'algorithmes :
 - *KPConv + PointPillars*
 - *GP-S3Net*
- Validation sur benchmark *DALES*

Axe 3 : Complexification

Complexification de la modélisation

- Extension vers forêt boréale fermée
- Intégration éléments non forestiers

Segmentation sémantique de strates végétales

- Validation sur benchmark [Kalinicheva et al., 2021]

Création du benchmark boréal

- Compilation des études de sensibilité
- Mise en ligne en accès libre
- Comparatif des méthodes état de l'art



Axe 3 : Cas d'études

Cas d'application sur forêts tempérées :

- Modèles et inventaires forestiers : **Expérience RAMI 4** [Widlowski et al., 2013]
- Données réelles : [IGN LiDAR HD](#)

Source : Google image



Axe 3 : Cas d'études

Cas d'application sur forêts
tropicales :

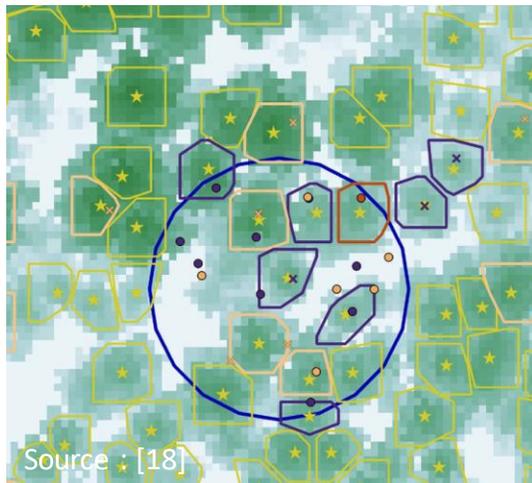
- Modèles et inventaires forestiers : **Antonio FERRAZ**
- Données réelles : **Antonio FERRAZ**

Source : Google image

Machine Learning en milieu forestier

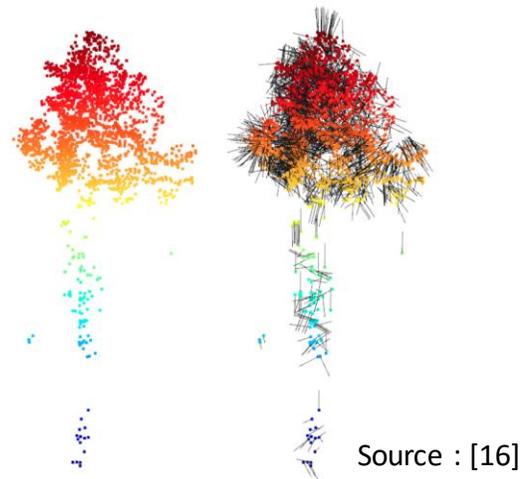
Détection d'arbres individuels :

- Majorité de travaux en 2D
- Fusion courante entre hyperspectral et LiDAR



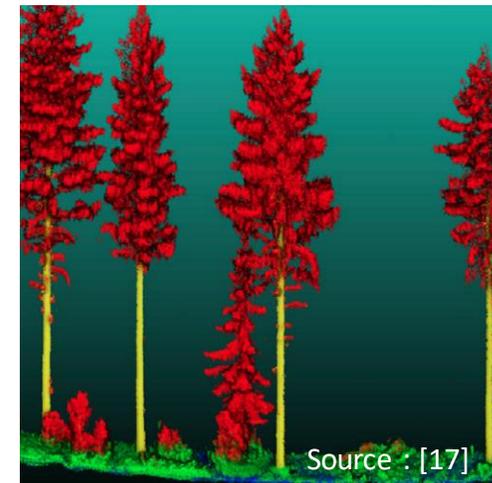
Classification d'arbres :

- Majorité de travaux en ML
- DL > ML



Segmentation sémantique :

- Labelisation manuelle courante, même en 3D
- Faible utilisation des méthodes *état de l'art* dans les nomenclatures complexes



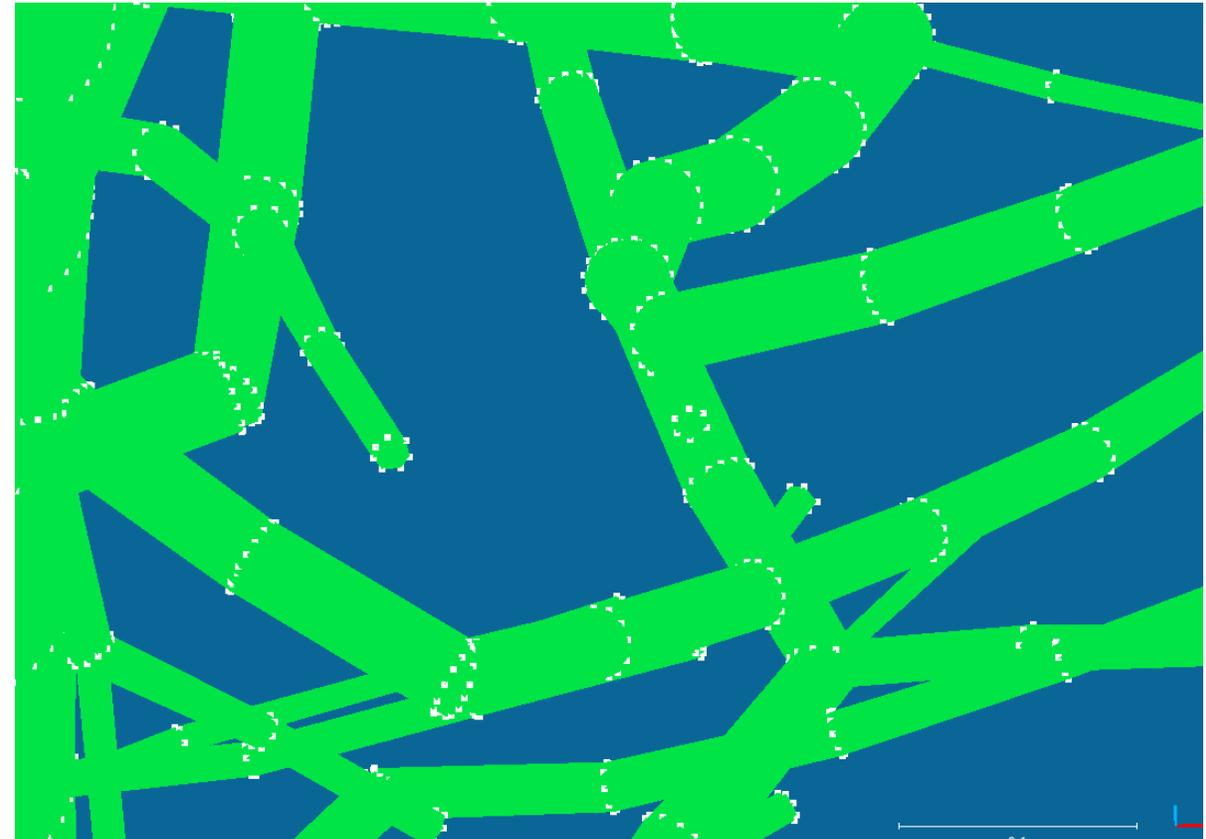
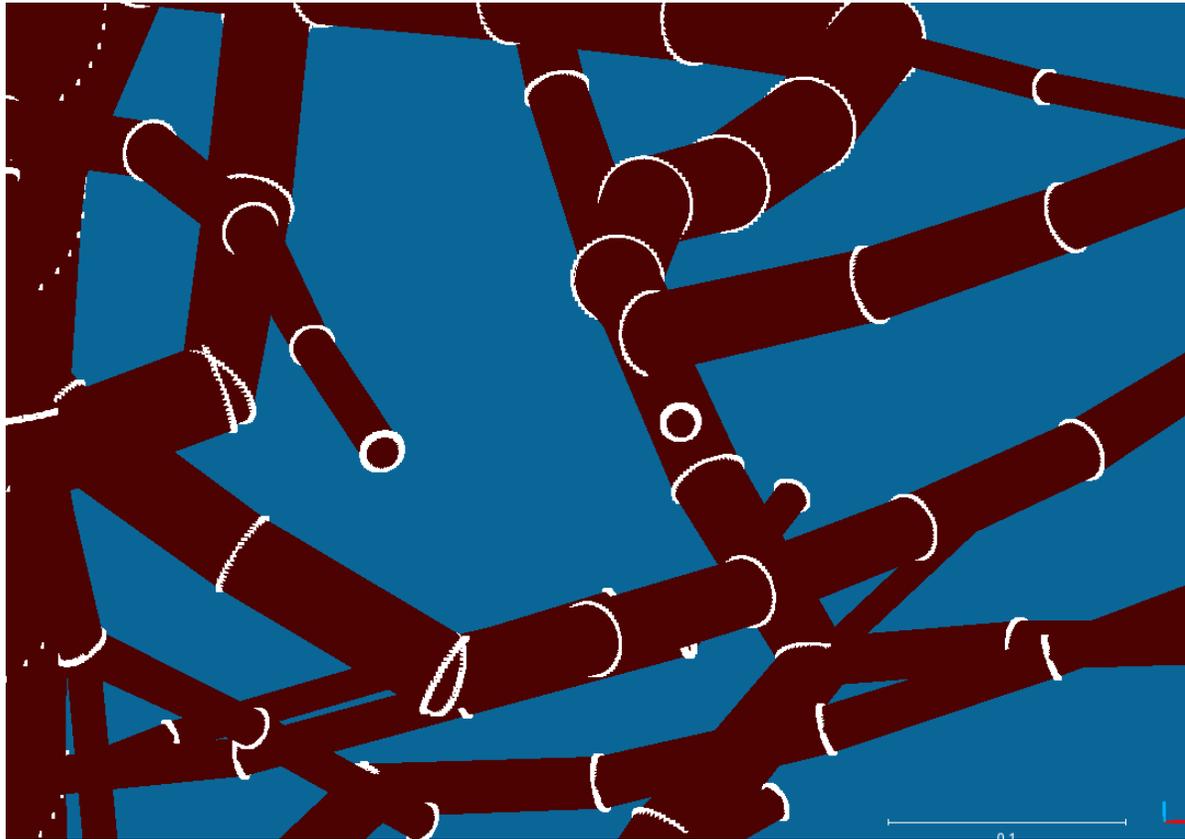
Échéancier et contributions

		2022		2023			2024	
		E	A	H	E	A	H	E
Axe 1	Modélisation	■						
	Simulation	■						
	Entraînement basique	■						
	Validation		■					
	Rédaction Article 1	■	■					
Axe 2	É.S. param. modélisation		■					
	É.S. param. acquisition		■					
	Entraînement approfondi		■					
	Rédaction Article 2		■	■				
	Segmentation d'instance			■				
	Segmentation panoptique			■				
	Rédaction Article 3			■	■			
Axe 3	Enrichissement nomenclature				■			
	Création <i>benchmark</i>				■			
	Rédaction Article 4				■			
	Appli. forêt tempérée					■	■	
	Appli. forêt tropicale					■	■	
Paperasserie	Réunion d'encadrement			■				
	Rédaction					■	■	
	Soutenance						■	

Articles :

1. Création de données d'apprentissage de DL LiDAR ALS virtuelles pour le milieu forestier boréal avec HELIOS++
2. Étude d'impact des paramètres de simulation de données LiDAR ALS virtuelles sur la qualité de la segmentation sémantique en milieu forestier
3. Segmentation panoptique et détection d'objet par DL en forêt boréale à partir de données LiDAR ALS simulées.
4. Benchmark ALS virtuel pour la segmentation sémantique, d'instance et panoptique en milieu forestier boréal

Simplification : Structure ligneuse

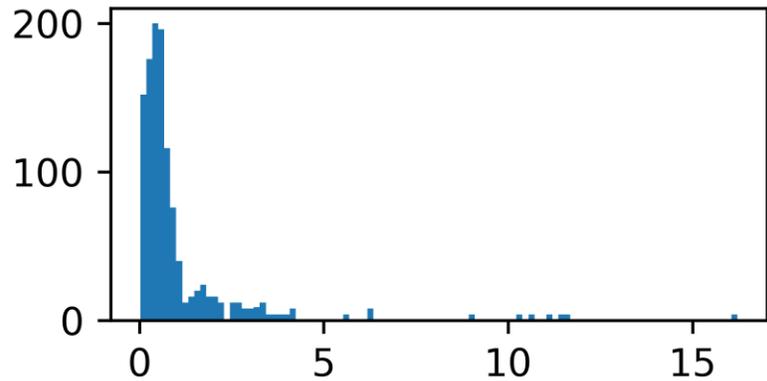


Tailles de fichiers simplifie

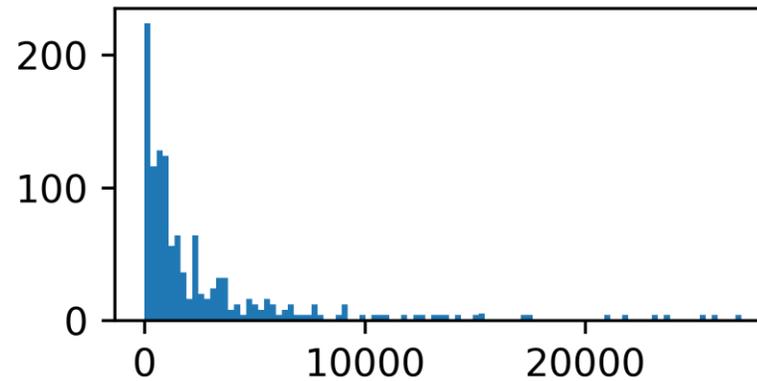
Simplification : résultats

Fichier voxel < 5 Mo pour voxel de 5cm

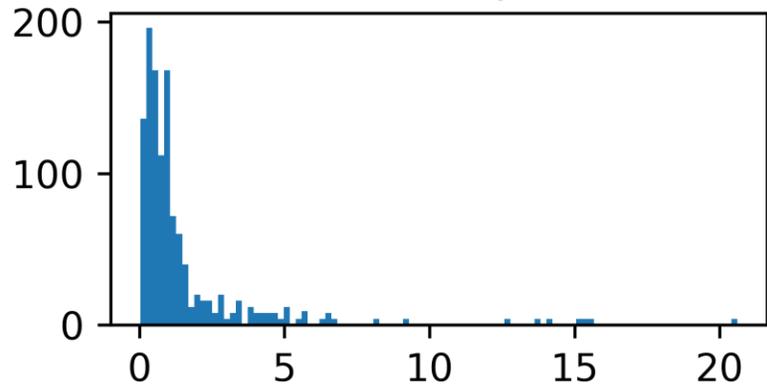
Tailles de fichiers de troncs (Mo)



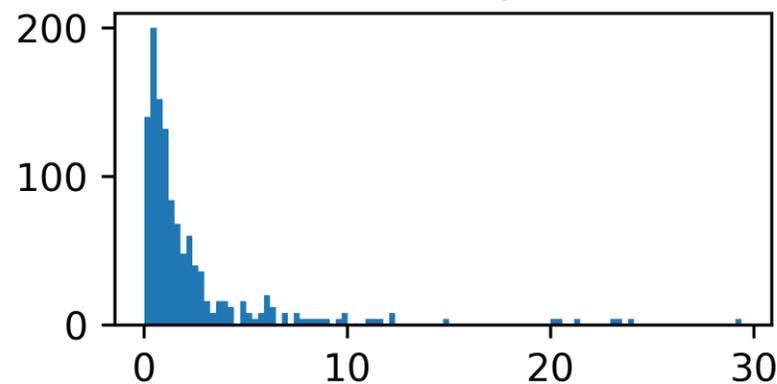
Nombres de pousses (n)



Esti. modèles complets 2D (Mo)



Esti. modèles complets 3D (Mo)



Limite = 25Mo

71Go à 11Go

Simulation de structure spatiale

- Travaux de Pommerening & Stoyan 2002 : simulation et reconstruction à partir de NNSS

Eq.	NNSS (reference(s))	Diversity of:	Formula
1.1	Distance to 1st, ..., n th neighbour (Pommerening, 2006)	Tree positions	Histograms with class width 0.5m
1.2	Mean directional index (Illian et al. 2008)	Tree positions	$R_i = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n \cos \alpha_{ij}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n \sin \alpha_{ij}\right)^2}$
1.3	Species mingling (Füldner 1995; Aguirre et al. 2003)	Tree species	$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_j$
1.4	DBH differentiation (1) (Füldner 1995; Pommerening 2002)	Tree dimensions	$TD_i = 1 - \frac{\min(\text{DBH}_i, \text{DBH}_n)}{\max(\text{DBH}_i, \text{DBH}_n)}$
1.5	DBH differentiation (2) (Füldner, 1995; Gadow, 1999)	Tree dimensions	$TDm_i = 1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{\min(\text{DBH}_i, \text{DBH}_j)}{\max(\text{DBH}_i, \text{DBH}_j)}$
1.6	DBH dominance (Gadow and Hui 2002; Aguirre et al. 2003)	Tree dimensions	$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_j$