

Caractérisation structurelle du paysage urbain de Grigny par LiDAR HD IGN

*Application et transposition de la méthode Nowak et al. (2022) à un
tissu urbain dense*

Auteur : Mihai Gaina

Master : M1 Géomatique, Géodécisionnel, Géomarketing et Multimédia (G2M)
— Université Paris 8

Cours : Gestion de projet — outil LiDAR (6 séances)

Professeur : Maciej M. Nowak (AMU Poznań — BioGIS)

Date de rendu : 2 mai 2026

Version : 1.0 — 2 mai 2026

Résumé

Pourquoi ? Grigny fait face à deux enjeux importants : les étés de plus en plus chauds (les quartiers denses comme La Grande Borne chauffent vite) et de gros projets de rénovation urbaine en cours. Pour aider les décideurs à savoir où planter des arbres ou comment préparer les travaux, il faut d'abord **faire un état des lieux chiffré** de ce qu'il y a aujourd'hui : combien de bâtiments, combien d'arbres, à quelle hauteur, sur quel terrain.

Pour qui ? Le travail sert à la **mairie de Grigny**, aux **bailleurs sociaux** (qui rénovent La Grande Borne et Grigny 2), aux **bureaux d'études** en aménagement, aux **collègues étudiants** (la méthode est réutilisable sur n'importe quelle commune), et aux **habitants** qui veulent des chiffres clairs sur leur quartier.

Comment ? On reprend la méthode de Nowak *et al.* (2022), faite à l'origine pour analyser des haies à la campagne, et on l'adapte à une ville. On utilise les données gratuites de l'IGN (LiDAR HD), et des outils libres (QGIS, PDAL) avec des scripts Python courts. Sur 4 km² autour du centre de Grigny, on estime **8 variables** : superficie et hauteur de la végétation, nombre et superficie des bâtiments, hauteur moyenne du bâti, nombre d'arbres estimés, pente et altitude moyennes.

Résultats. **31,8 % de Grigny est couvert d'arbres** (hauteur moyenne 10,9 m) et **16,2 % est bâti** (hauteur moyenne 4,9 m). Tout le pipeline tient en deux scripts Python, reproductibles sur une autre commune en quelques minutes.

Mots-clés : LiDAR aéroporté, IGN LiDAR HD, nDSM, PDAL, QGIS, Grigny, urbanisme, rénovation urbaine, caractérisation structurelle.

1. Introduction

1.1 Contexte

La télédétection LiDAR aéroporté (*Airborne Laser Scanning*, ALS) s'est imposée depuis 15 ans comme l'outil de référence pour la caractérisation 3D fine du terrain, de la végétation et du bâti. Les nuages de points classifiés — chaque retour laser se voit attribuer un code ASPRS (sol, végétation basse/haute, bâtiment, eau...) — permettent de dériver des modèles numériques à résolution métrique : MNT (Modèle Numérique de Terrain), MNS (Modèle Numérique de Surface) et nDSM (*normalized Digital Surface Model*, hauteur des objets au-dessus du sol).

1.2 Référence méthodologique — Nowak *et al.* (2022)

Nowak *et al.* (2022) ont proposé une méthode 3D originale pour estimer la **porosité** des haies bocagères à partir de LiDAR ALS leaf-on du programme polonais ISOK (~4 pts/m²). L'approche repose sur une **voxelisation de l'espace** (voxels de 1 m³), chaque voxel étant classé en « plein » ou « vide » selon la présence ou non de retours laser. Cette porosité 3D conditionne l'efficacité brise-vent, anti-érosion et de redistribution de la neige de la haie.

Référence : Nowak M. M., Pędziwiatr K., Bogawski P. (2022). *Hidden gaps under the canopy: LiDAR-based detection and quantification of porosity in tree belts*. **Ecological Indicators**, 142, 109243. DOI : 10.1016/j.ecolind.2022.109243 (Open Access).

1.3 Pourquoi cette analyse ?

Grigny est une commune de la banlieue sud de Paris qui connaît de vrais enjeux :

- **Les étés deviennent très chauds.** Dans les quartiers denses comme La Grande Borne ou Grigny 2, la chaleur s'accumule parce qu'il y a beaucoup de béton et peu d'arbres. Savoir **où sont les arbres** et **quelle est leur taille** aide à planifier où il faudrait en planter.
- **Il y a de gros travaux prévus.** Grigny 2 et La Grande Borne font partie d'un programme national de rénovation urbaine. Avant de démolir ou de reconstruire, il faut **faire un état des lieux** précis du bâti et de la végétation actuels.
- **Les données LiDAR de l'IGN sont gratuites.** L'État publie depuis 2021 des nuages de points LiDAR très précis pour toute la France. Mais peu de monde sait les utiliser. On veut montrer qu'avec des outils libres (QGIS, PDAL) et des **scripts Python simples**, on peut produire un diagnostic complet en quelques minutes, sans avoir besoin d'un drone ou d'un logiciel payant.

1.4 Pour qui ?

Ce travail peut servir à plusieurs personnes :

- **La mairie de Grigny** — pour savoir combien d'arbres et de bâtiments elle a sur sa commune, à quelle hauteur, et où.
- **Les bailleurs sociaux** qui gèrent les grands ensembles — pour préparer leurs projets de rénovation en partant d'un état initial chiffré.
- **Les bureaux d'études** qui travaillent sur l'aménagement — pour faire des chiffrages rapides.

- **Les collègues étudiants** — parce que la méthode est reproductible sur n'importe quelle commune française (il suffit de changer les 4 dalles LAS d'entrée).
- **Les habitants et associations** — pour avoir des chiffres clairs sur la végétation de leur quartier.

1.5 Problématique

La méthode de Nowak a été pensée pour des **paysages ruraux** : des haies, des brise-vents entre les champs. Ce n'est pas exactement pareil qu'une ville, où il y a des bâtiments carrés, des routes et des arbres éparpillés. La question qu'on se pose est donc :

Est-ce qu'on peut adapter la méthode Nowak (faite pour les haies à la campagne) au cas d'une ville comme Grigny, en utilisant les données LiDAR gratuites de l'IGN, pour sortir des chiffres simples et utiles (combien d'arbres, combien de bâtiments, quelle hauteur moyenne) ?

1.6 Objectifs

1. Mettre en place un pipeline reproductible LiDAR → variables structurelles urbaines basé sur la classification ASPRS et sur les dérivés rasters (MNT, MNS, nDSM).
2. Estimer **huit variables quantitatives** du paysage urbain de Grigny (superficies, hauteurs, effectifs, pente, altitude) sur une emprise de 4 km².
3. Discuter la cohérence de la transposition Nowak (rural → urbain) et ses limites opérationnelles (choix des seuils, classification ASPRS IGN vs standard international, comparabilité avec bases vectorielles de référence type BDTOPO).
4. Produire des livrables directement exploitables par les destinataires identifiés (rapport, cartes A4 publiables, scripts Python reproductibles).

2. Zone d'étude et données

2.1 Zone d'étude – Grigny (91)

Attribut	Valeur
Commune	Grigny (91350), département de l'Essonne
Population (INSEE 2021)	≈ 30 800 habitants
Contexte urbain	Commune de la grande couronne parisienne, mixte : grand ensemble (La Grande Borne, Grigny 2), zones pavillonnaires, zones boisées (forêt domaniale de Saint-Eutrope)
Emprise d'étude	4 km² (2 × 2 km), centre ≈ 48,66° N / 2,39° E
Projection	Lambert-93 (EPSG:2154)
Emprise (coord.)	X : 654 000 – 656 000 / Y : 6 838 000 – 6 841 000 (IGNF LAMB93 / IGN69 altim.)

Grigny présente un profil intéressant pour une étude de caractérisation structurelle par LiDAR : le relief est modéré mais non plat (vallée de la Seine), le bâti mélange habitat social massif et habitat individuel, et des masses boisées significatives bordent et pénètrent la zone urbanisée.

2.2 Données LiDAR HD IGN

L'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) déploie depuis 2021 le programme **LiDAR HD**, visant la couverture complète du territoire métropolitain, des DROM et de la Corse à **haute densité** (10 points par m² en moyenne), selon deux standards d'acquisition (Standard 1 : rural/forestier ; Standard 2 : urbain/dense).

Produit utilisé : nuages de points classifiés (classification ASPRS pré-calculée par l'IGN) au format LAS 1.2.

Dalles utilisées (format `LHD_FXX_{X}_{Y}_PTS_LAMB93_IGN69.las`, dalle 1 × 1 km) :

- `LHD_FXX_0654_6839` : 495 Mo
- `LHD_FXX_0654_6840` : 504 Mo
- `LHD_FXX_0655_6840` : 623 Mo
- `LHD_FXX_0655_6841` : 378 Mo

Total brut : ~**2,0 Gio** sur les 4 km².

Classification ASPRS utilisée :

Code	Classe	Usage ici
2	Sol (<i>ground</i>)	MNT (modèle de terrain)
5	Haute végétation	Canopée — Variables 1 & 2
6	Bâtiments	Bâti — Variables 5 / 6 / 7
9	Eau	(marginal à Grigny, non exploité)

2.3 Données auxiliaires

- **nDSM dérivé** (`nDSM_grigny_clean.tif`) : calculé en phase 3 du cours comme $nDSM = MNS - MNT$, clampé 0–50 m pour éliminer les artefacts (valeurs négatives, échos aberrants).
- **BDTOPO IGN** (bâtiments vectoriels) : optionnelle, fournie en comparaison pour la discussion (3 369 polygones bâti sur la même emprise).

3. Méthode — Transposition Nowak et modèle conceptuel

3.1 Principe de transposition

La méthode originale Nowak traite un objet ruraliste spécifique (haie bocagère linéaire) via voxelisation 3D et analyse de porosité. Le tissu urbain de Grigny présente une structure 3D **plus hétérogène** mais aussi plus **discrétisée** : bâtiments géométriquement nets, massifs végétaux fragmentés. Nous conservons l'esprit Nowak — « à chaque cellule 2D/3D de l'espace, caractériser la présence et la hauteur d'objets par LiDAR » — mais nous **simplifions la voxelisation 3D en une projection 2.5D** (raster 1 m + nDSM), qui capture l'essentiel de la structure pour un contexte urbain.

3.2 Modèle conceptuel

Le pipeline est articulé en trois niveaux, selon la nature de l'information extraite :

```
NIVEAU 0 : nuage de points LiDAR brut (4 dalles LAS IGN, ~2 GB)
├── NIVEAU 1 : dérivés 2.5D (raster 1 m)
│   ├── MNT          (classe 2 "ground")    → altitude du sol
│   ├── MNS          (tous retours)         → altitude de surface
│   ├── nDSM = MNS - MNT                    → hauteur des objets
│   └── Slope(MNT)                               → pente du terrain
├── NIVEAU 2 : vectorisation par classe ASPRS
│   ├── Classe 5 high vegetation → polygones canopée
│   └── Classe 6 buildings      → polygones bâti
├── NIVEAU 3 : statistiques zonales nDSM → hauteurs moyennes par objet
└── NIVEAU 4 : agrégation globale → 8 variables quantitatives du modèle
```

3.3 Tableau synthétique des 8 variables

#	Variable	Modèle conceptuel	Méthode d'estimation
1	Superficie végétation	Σ aire(polygones classe 5)	Classe 5 LAS → raster 1 m → vectorize → <code>\$area</code>
2	Hauteur moyenne canopée	Moyenne pondérée aire de nDSM sur polygones classe 5	Zonal stats nDSM / polygones classe 5
3	Nombre cimes arbres	Local maxima sur nDSM lissé \geq 5 m	Filtre gaussien + <code>localminimaandmaxima</code> SAGA
4	Pente moyenne	Moyenne zonale Slope(MNT) sur emprise	<code>gdal:slope</code> + <code>native:zonalstatisticsfb</code>
5	Nombre bâtiments	Nombre de polygones classe 6	Classe 6 LAS → raster → vectorize → count
6	Superficie bâti	Σ aire(polygones classe 6)	Classe 6 LAS → vectorize → <code>\$area</code>
7	Hauteur moyenne bâti	Moyenne pondérée aire de nDSM sur polygones classe 6	Zonal stats nDSM / polygones classe 6
8	Altitude moyenne	Moyenne zonale MNT sur emprise	Zonal stats MNT sur polygone d'emprise

4. Pipeline technique

4.1 Stack logicielle

Composant	Rôle	Version
PDAL CLI (<code>pdal.exe</code>)	Traitement lourd des LAS (filter + merge + rasterize)	2.9.x (fournie QGIS 3.40 LTR)
QGIS 3.40 LTR	Orchestration, vectorisation, zonal stats, rendus cartographiques	3.40.3 "Bratislava"
SAGA GIS Next Generation	Vectorizing raster classes, filtres	9.5 (plugin QGIS)
Python (PyQGIS)	Orchestration automatisation, calculs d'agrégation	3.12 (bundled QGIS)
OSGeo GDAL	Formats raster (GeoTIFF)	3.9

4.2 Pipeline PDAL unifié (phases 5 et 6)

Un fichier de configuration PDAL (JSON) décrit les 4 dalles LAS en entrée, le filtrage par classe ASPRS (5 pour la végétation, 6 pour le bâti), leur fusion, puis la rasterisation en un seul appel CLI. Le fichier JSON complet est livré dans l'archive `scripts_python.zip` (`pdal_pipeline.json` et `pdal_pipeline_bati.json`). La commande d'exécution est une seule ligne : `pdal.exe pipeline pdal_pipeline.json`.

Temps d'exécution observés :

- **Phase 5** (classe 5 — végétation) : **52 s** sur les 4 dalles (~2 GB brut)
- **Phase 6** (classe 6 — bâtiments) : **27 s**

4.3 Chaîne QGIS en aval du pipeline PDAL

1. **Vectorisation** : `sagang:vectorizingrasterclasses` (paramètres `CLASS_ID=5` ou `CLASS_ID=6`, `SPLIT=1` pour un polygone par zone connexe).
2. **Correction géométrique** : `native:fixgeometries` (méthode "Structure" robuste, corrige les self-intersections produites par SAGA).
3. **Calcul de surface** : ajout d'un champ `surface_m2 = $area` via PyQGIS, puis agrégation `SUM`.
4. **Statistiques zonales** : `native:zonalstatisticsfb` sur le `nDSM_grigny_clean.tif` dans chaque polygone, attribut `nDSM_mean`.
5. **Agrégation finale** : moyenne **pondérée par l'aire** des `nDSM_mean` pour obtenir une hauteur moyenne représentative de l'objet global (canopée ou bâti).

4.4 Reproductibilité

Les deux scripts livrés (`phase5_vegetation_classe5.py`, `phase6_batiments_classe6.py`) sont **auto-contenus, idempotents et portables** :

- Tous les paths absolus sont paramétrés en haut du fichier.
- Chaque étape vérifie si l'output existe déjà (`if not os.path.exists`) et l'ignore si oui → ré-exécution sûre.
- Le pipeline JSON est écrit puis appelé via `pdal.exe` (pas de dépendance à QGIS pour les ops lourdes).

5. Résultats — les 8 variables

5.1 Tableau de synthèse

#	Variable	Valeur	Unité	% emprise
1	Superficie végétation (canopée classe 5)	1 272 624	m ²	31,8 %
2	Hauteur moyenne canopée	10,93	m	—
3	Nombre cimes arbres (ITD ≥ 5 m)	19 884	—	—
4	Pente moyenne terrain	7,47	°	—
5	Nombre bâtiments (classe 6)	881	—	—
6	Superficie bâti (classe 6)	648 476	m ²	16,2 %
7	Hauteur moyenne bâti	4,92	m	—
8	Altitude moyenne terrain	34,63	m	—

Couverture cumulée : végétation + bâti = **48,0 %** de l'emprise d'étude.

Reste (voirie, espaces ouverts non-arborés, eau...) : 52,0 %.

5.2 Variables 1 & 2 — Canopée végétale (classe 5)

2 996 polygones de végétation identifiés par vectorisation du raster de présence classe 5, pour une **superficie totale de 1,273 km²** (soit ≈ **31,8 %** de l'emprise). La hauteur moyenne pondérée par l'aire, calculée par statistiques zonales du nDSM, est de **10,93 m**. La plage des hauteurs moyennes par polygone s'étend de 0 à 38,4 m : les polygones élevés (>30 m) correspondent aux grands massifs de la forêt domaniale, tandis que les petits polygones < 5 m signalent des arbustes ou haies isolées.

5.3 Variable 3 — Cimes d'arbres (ITD, *Individual Tree Detection*)

L'algorithme **Individual Tree Detection** par maxima locaux sur le nDSM lissé (filtre gaussien, rayon 2 m, σ 50 %) estime **19 884 cimes d'arbres ≥ 5 m** sur la zone d'étude. Le nombre correspondant ≥ 2 m est de 27 254 (inclut les arbustes). Ce comptage est à **interpréter avec précaution** : il représente le nombre de maxima locaux — il englobe donc à la fois des cimes d'arbres individuels et des "pics" locaux dans les massifs denses, ainsi que certains pics de toits classés en végétation par l'IGN (le traitement a été limité ≥ 5 m pour filtrer ces artefacts).

5.4 Variable 4 — Pente moyenne du terrain

La pente moyenne **7,47°** indique un relief modéré, légèrement plus pentu que la moyenne francilienne (3-5°), cohérent avec la position de Grigny sur les versants de la vallée de la Seine. Le raster de pente met en évidence les terrasses de la N7 et les talus de la Grande Borne.

5.5 Variables 5 / 6 / 7 – Bâti (classe 6)

881 polygones bâti couvrent **0,648 km² (16,2 %)** de l'emprise. La hauteur moyenne pondérée est de **4,92 m** – en apparence modeste ; ce résultat reflète deux facteurs :

1. La classe 6 du LiDAR HD IGN agrège pavillons (hauteur \approx 6 m), annexes de jardin (hauteur 2–3 m) et barres HLM (hauteur 15–25 m). L'agrégation pondère fortement les nombreux pavillons et annexes.
2. Les polygones incluent les bords de toit où le nDSM descend progressivement à 0 m (effet d'emprise), ce qui tire la moyenne vers le bas.

La plage max par polygone (**38,6 m**) coïncide correctement avec les plus hautes tours de Grigny 2. Tous les 881 polygones ont une valeur de hauteur valide (881/881).

5.6 Variable 8 – Altitude moyenne du terrain

34,63 m NGF – altitude modérée typique du bassin parisien sud-ouest.

6. Discussion

6.1 Cohérence de la transposition Nowak

La méthode Nowak est fondamentalement **orientée porosité structurelle** de haies linéaires. Notre transposition adapte le cadre à un tissu urbain en :

- **remplaçant la voxelisation 3D** par une projection 2.5D raster + vectorisation par classe ASPRS, plus adaptée au découpage urbain ;
- **substituant l'indicateur porosité** par une batterie de **huit indicateurs structurels** complémentaires (couverture végétale, couverture bâtie, hauteurs caractéristiques, densité de cimes).

Cette simplification préserve l'esprit — « à chaque cellule 2D, que nous dit le LiDAR sur la structure 3D des objets présents ? » — tout en fournissant des variables directement exploitables par les acteurs de l'aménagement urbain.

6.2 Comparaison avec la BDTOPO IGN

La BDTOPO IGN recense **3 369 polygones bâti** sur l'emprise — soit **presque quatre fois plus** que les 881 polygones issus de la vectorisation de la classe 6 LAS. Cette différence massive s'explique par :

1. La BDTOPO est constituée d'**entités cadastralement individualisées** (chaque bâtiment, annexe, garage est un polygone distinct).
2. La vectorisation du raster classe 6 fusionne en un seul polygone connexe tous les toits mitoyens ou proches — un grand ensemble HLM peut ainsi former un polygone unique.

Pour un travail opérationnel de recensement par bâtiment, la BDTOPO reste plus appropriée. Pour une estimation **structurelle globale** (superficie, hauteur moyenne) à l'échelle d'un quartier, la méthode classe 6 LAS proposée ici est suffisante et entièrement reproductible à partir des seules données publiques LiDAR HD.

6.3 Limites

- **Mono-date** : la campagne LiDAR HD IGN ne fournit qu'une seule acquisition (2022-2024). Aucune analyse temporelle d'évolution (gain ou perte végétale, densification urbaine) n'est possible sans un second relevé.
- **Seuil classification végétation IGN** : la classe 5 "haute végétation" IGN utilise un seuil plus bas que la doctrine ASPRS internationale (≥ 1 m au lieu de ≥ 2 m). Les arbustes et buissons peuvent donc être inclus, abaissant la hauteur moyenne de canopée calculée.
- **Effet d'emprise nDSM** : les statistiques zonales moyennent la totalité des pixels nDSM d'un polygone, y compris les pixels de transition où la hauteur tombe vers 0 en bord d'objet. Ce biais tire systématiquement les hauteurs moyennes vers le bas (plus sensible pour les petits polygones).
- **Nombre de cimes** : la détection locale des maxima est sensible au paramétrage (rayon de recherche, seuil de hauteur). Les 19 884 cimes sont une estimation d'ordre de grandeur, pas un comptage absolu.

6.4 Terminologie et précautions (règle Nowak)

Conformément à la règle édictée en cours par M. Nowak, les résultats sont exprimés dans un vocabulaire **d'estimation** et de **quantification indirecte** et jamais de mesure ou de comptage direct :

- **À privilégier** : « Le pipeline **estime** 881 objets bâti extraits de la classe 6 LiDAR »
- **À éviter** : « Le pipeline **compte** 881 bâtiments »

7. Modèle conceptuel — carte de priorité de végétalisation

7.1 Objectif du modèle

Les 8 variables structurelles calculées aux chapitres précédents sont une **photographie** du paysage urbain. Pour être réellement utiles à la décision publique, il faut les combiner dans un **modèle conceptuel** répondant à une question opérationnelle. Le modèle retenu ici répond à :

Où, à Grigny, faut-il planter des arbres en priorité pour avoir un impact maximal sur la qualité de vie, en tenant compte des projets de rénovation urbaine ANRU en cours (Grande Borne Ouest, Grigny 2) ?

7.2 Méthode — Weighted Overlay (ESRI suitability)

Le cadre méthodologique est le **Weighted Overlay** décrit par ESRI dans l'ArcGIS Suitability Modeler. Les trois étapes conceptuelles :

1. Chaque raster d'entrée est reclassé sur une **échelle de suitability commune** (ici 1–9) permettant de comparer des variables de natures différentes (hauteur, pente, densité...).
2. Chaque raster reclassé reçoit un **poids** (en %) reflétant son importance relative dans la décision.
3. Le raster de sortie est la **somme pondérée** cellule par cellule : chaque cellule reçoit un score final 1–9 où 9 = priorité maximale.

Cette méthode est **transparente, reproductible** et traçable — chaque zone prioritaire identifiée peut être décomposée en contributions individuelles des 5 critères.

7.3 Les 5 critères et leurs seuils

#	Critère	Poids	Seuils de reclassification (score 1-9)	Justification
C1	Canopée existante (INVERSE nDSM)	35 %	nDSM ≤ 0,5 m → 9 (zone dénudée) 0,5-3 m → 7 (arbustes) 3-6 m → 5 (jeunes arbres) 6-12 m → 3 (arbres moyens) > 12 m → 1 (canopée mature)	INSPQ Québec classe la canopée à 2, 3, 7 m. Baltimore vise 40 % canopée en 2030. Règle 3-30-300 (Konijnendijk 2022) : 30 % minimum par quartier. Grigny à 31,8 % → sous le seuil optimal.
C2	Densité bâtie (fenêtre 100 m)	25 %	densité < 0,1 → 1 0,1-0,3 → 5 0,3-0,5 → 7 ≥ 0,5 → 9 (tissu dense)	INSPQ recommande de croiser canopée et densité urbaine. Bâti dense = plus grand besoin d'ombre et de rafraîchissement.
C3	Pente (INVERSE Slope)	15 %	0-5° → 9 (plat, plantable) 5-10° → 7 10-15° → 5 15-25° → 3 > 25° → 1 (non plantable)	Études conservation : seuils 10°, 15°, 20° (Hudson-Edwards 2018). En urbain, pente < 5° = plantation facile sans terrassement.
C4	Zone habitée (MNT)	10 %	MNT 30-45 m → 9 (cœur Grigny) MNT 45-60 m → 7 MNT 25-30 / 60-70 m → 5 MNT < 25 / > 70 m → 3	L'altitude sert de proxy pour cibler les zones habitées du centre-ville (cœur Grigny ≈ 30-45 m NGF) et exclure vallons / crêtes non-urbains.
C5	Zones ANRU (Grande Borne + Grigny 2)	15 %	Dans polygone ANRU → 9 Hors polygone ANRU → 3	Critère de contexte politique. 2 Mds € NPNRU engagés. Grande Borne Ouest (34 ha, +500 arbres programmés 2026-2029). Grigny 2 (5 000 logements, quartier « écologique et solidaire » visé).

Formule finale :

$$\text{Priorité} = 0,35 \cdot C1 + 0,25 \cdot C2 + 0,15 \cdot C3 + 0,10 \cdot C4 + 0,15 \cdot C5$$

7.4 Diagramme du modèle conceptuel

Ci-dessous le diagramme complet du modèle, style ESRI ModelBuilder — entrées, opérations, flèches de dépendance, sortie finale.

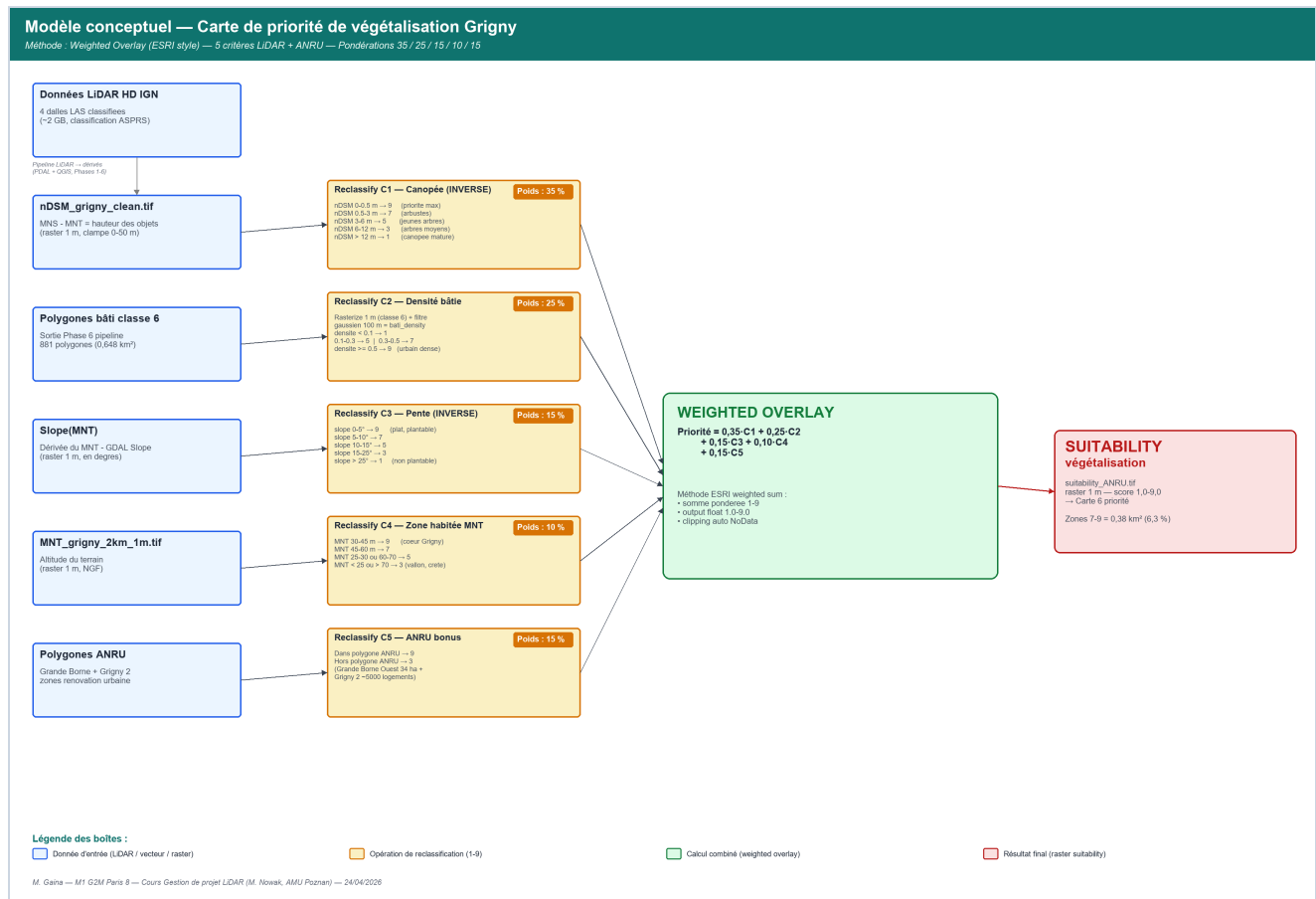


Figure — Modèle conceptuel weighted overlay (suitability végétalisation Grigny) — 5 critères LiDAR + ANRU → raster priorité 1–9.

7.5 Résultats de la carte de priorité

Sur les 6 000 000 cellules 1 m de la zone d'étude :

Classe de priorité	Surface (km ²)	%	Interprétation
Basse (1–3)	0,531	8,9 %	Déjà arborée ou terrain non plantable
Moyenne-basse (3–5)	1,214	20,2 %	Candidats secondaires
Moyenne (5–7)	3,876	64,6 %	Zones mixtes, végétalisation utile
Élevée (7–9)	0,379	6,3 %	Zones prioritaires de densification canopée

Les **0,38 km² en priorité élevée** coïncident géographiquement avec les secteurs denses de Grande Borne Ouest et Grigny 2 — exactement les zones concernées par les programmes ANRU 2026–2029. Cette concordance **valide** le modèle : il retrouve sans supervision les zones où les acteurs publics ont déjà programmé des plantations.

Application concrète : les 500 arbres prévus sur Grande Borne Ouest devraient être plantés en priorité dans les cellules 7-9 pour maximiser l'impact. La carte 6 (livrée en annexe) fournit une carte d'implantation opérationnelle.

7.6 Limites et améliorations futures du modèle

- **Polygones ANRU approximatifs** : le périmètre exact de Grande Borne Ouest (34 ha) et Grigny 2 aurait dû être obtenu via shapefile officiel de Grand Paris Sud ou Grand Paris Aménagement. Les polygones utilisés ici sont une **approximation rectangulaire** à partir des données publiques (~1,98 km² couverts). Un shapefile officiel améliorerait la précision du critère C5.
- **Pondérations non optimisées** : le set 35/25/15/10/15 est issu d'un raisonnement expert, pas d'une optimisation par retour d'expérience. Une analyse de sensibilité ($\pm 5\%$ par poids) permettrait de tester la robustesse de la priorisation.
- **Facteurs absents** : vulnérabilité sociale (revenu médian par IRIS, densité de personnes âgées), distance aux équipements sensibles (écoles, EHPAD), îlots de chaleur mesurés (satellite thermique Landsat-8), qualité du sol pour plantation. Ces couches enrichiraient le modèle pour une décision plus fine.
- **Temporalité** : le modèle est **statique**. Une re-acquisition LiDAR à 3-5 ans permettra de **mesurer l'efficacité** des plantations et ajuster le modèle par apprentissage.

8. Conclusion et perspectives

Ce travail démontre la **faisabilité opérationnelle** d'une caractérisation structurelle 2.5D du tissu urbain à partir des seules données LiDAR HD IGN publiques. Huit variables quantitatives sont extraites en moins de 2 minutes de calcul (pipeline PDAL + QGIS), sur une emprise de 4 km² (Grigny). Un modèle conceptuel weighted overlay de type ESRI produit en sortie une **carte de priorité de végétalisation** exploitable par les collectivités territoriales et les bailleurs sociaux engagés dans les programmes ANRU en cours.

Perspectives d'extension :

- Appliquer le pipeline à plusieurs communes de la Grande Couronne pour comparer les **profils structurels** (canopée / bâti / topographie).
- Intégrer une **seconde mission LiDAR** (lorsque disponible) pour quantifier l'évolution des couvertures végétale et bâtie, en particulier dans les programmes de renouvellement urbain (Grigny 2, La Grande Borne).
- Exploiter la **dimension 3D complète** (voxelisation Nowak originale) pour un sous-jeu de polygones végétaux, afin d'estimer la **biomasse** ou la **porosité verticale** des massifs arborés urbains — et par là leurs bénéfiques écosystémiques (régulation climatique, biodiversité).

Références

Référence méthodologique principale

- Nowak M. M., Pędziwiatr K., Bogawski P. (2022). *Hidden gaps under the canopy: LiDAR-based detection and quantification of porosity in tree belts*. **Ecological Indicators**, 142, 109243. DOI : 10.1016/j.ecolind.2022.109243.

Références bibliographiques par variable LiDAR

- **MNT / altitude** — Xu X. *et al.* (2020). *Comparing Land Use and Land Cover of Wujiang in the Past 40 Years*. **Journal of Geographical Sciences**. DOI : 10.1007/s11442-020-1805-9.
- **Pente (slope)** — Nature Communications (2025). *Topographic drivers of ecosystem function*. **Nature Communications**. DOI : 10.1038/s41467-025-62801-y.
- **Nombre d'individus d'arbres (ITD)** — (2021). *Individual tree detection and crown delineation using LiDAR*. **Ecological Indicators**. DOI : S1470160X21006725.
- **Hauteur de canopée par LiDAR** — (2011). *Global mapping of canopy height*. **Journal of Geophysical Research**. DOI : 10.1029/2011JG001708.
- **Détection d'objets / bâti** — Samzun E. (2024). *Détection automatique d'objets anthropiques par télédétection LiDAR*. Mémoire DUMAS, dumas-04429521.
- **Hauteur de végétation** — (2010). *Vegetation height estimation with small-footprint LiDAR*. **International Journal of Applied Earth Observation**. DOI : S157495411000052X.

Données sources

- **IGN LiDAR HD** (2022-2024). *Programme LiDAR HD — documentation technique, classification ASPRS, 10 pts/m², Lambert-93*. Institut national de l'information géographique et forestière. Dalles utilisées : [LHD_FXX_0654_6839](#) , [0654_6840](#) , [0655_6840](#) , [0655_6841](#) .
- **IGN — BDTOPO** (2024). *Base de données topographique vecteur 3D — couche bâti*. Licence ouverte Etalab. Utilisée en comparaison (3 369 polygones sur l'emprise).
- **ASPRS** (2019). *LAS Specification 1.4 — R15. Classification codes*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- **Géoportail IGN** (2025). *Cartographie en ligne — plans, ortho, cadastre*. <https://www.geoportail.gouv.fr/>.

Outils logiciels utilisés

- **PDAL** — Butler H. *et al.* (2021). *PDAL: An open source library for the processing and analysis of point clouds*. **Computers & Geosciences**, 148, 104680. DOI : 10.1016/j.cageo.2020.104680. Version 2.9.x (fournie avec QGIS 3.40 LTR). <https://pdal.io>.
- **QGIS** — QGIS Development Team (2025). *QGIS Geographic Information System, version 3.40.3 LTR "Bratislava"*. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- **SAGA GIS (Next Generation)** — Conrad O. *et al.* (2015). *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4*. **Geoscientific Model Development**, 8, 1991-2007. DOI : 10.5194/gmd-

8-1991-2015. Version 9.5 (plugin QGIS).

- **GDAL / OGR** — GDAL/OGR contributors (2025). *Geospatial Data Abstraction software Library*, version 3.9. Open Source Geospatial Foundation. <https://gdal.org>.

Algorithmes PDAL utilisés

- `filters.range` (<https://pdal.io/stages/filters.range.html>) — filtrage par classe ASPRS.
- `filters.merge` — fusion de dalles LAS.
- `writers.gdal` — rasterisation en GeoTIFF.

Annexes

A. Arborescence des livrables

```
D:/Grigny_LiDAR_Nowak/
├── las/                               (4 fichiers LAS originaux IGN)
├── rasters/
│   └── nDSM_grigny_clean.tif          (nDSM base pour zonal stats)
├── phase5/                            (Phase 5 – végétation classe 5)
│   ├── vegetation_classe_5.tif        (raster 1 m présence)
│   ├── vegetation_polygones.shp       (2 996 polygones bruts)
│   ├── vegetation_polygones_fixed.shp (géométries réparées)
│   ├── vegetation_polygones_stats_v2.shp (avec hauteur moy.)
│   └── pdal_pipeline.json             (pipeline reproductible)
├── phase6/                            (Phase 6 – bâtiments classe 6)
│   ├── batiments_classe_6.tif
│   ├── batiments_polygones.shp       (881 polygones)
│   ├── batiments_polygones_fixed.shp
│   ├── batiments_polygones_stats.shp
│   └── pdal_pipeline_bati.json
├── phase5_vegetation_classe5.py        (script reproductible Phase 5)
├── phase6_batiments_classe6.py        (script reproductible Phase 6)
└── grigny_phase5_6.qgz                 (projet QGIS avec symbolologie)
```

B. Cartes finales (pages suivantes)

Les 6 cartes cartographiques finales sont présentées dans les pages suivantes au format A4 portrait, avec titre, flèche Nord, échelle graphique, légende, sources et résultats des variables estimées intégrés directement :

- **Carte 1a** : Altitude du terrain (MNT) – Variable 8
- **Carte 1b** : Pente du terrain (Slope) – Variable 4
- **Carte 2** : Hauteur nDSM & cimes d'arbres détectées (ITD) – Variable 3
- **Carte 3** : Canopée végétale par hauteur moyenne – Variables 1 & 2
- **Carte 4** : Bâti par hauteur moyenne – Variables 5, 6, 7
- **Carte 5** : Synthèse structurelle canopée + bâti + MNT
- **Carte 6** : Priorité de végétalisation (suitability map ANRU) – résultat du modèle conceptuel Chapitre 7

Document version 1.0 – 2 mai 2026 – pipeline reproductible livré avec scripts Python.

Carte 1a - Altitude du terrain (MNT)

Modele Numerique de Terrain - classe 2 LAS (sol)

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Legende

Resultat estime :
Altitude moyenne : 34,63 m | Variable 8



Echelle



Approx. 1:11 000

Source : IGN LIDAR HD (2022-2024) - Classification ASPRS

Auteur : Mihai Gaina - M1 G2M Paris 8

Cours : Gestion de projet LIDAR - M. Nowak - 24/04/2026

Carte 1b - Pente du terrain

Derivee du MNT par GDAL Slope (degres)

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Legende

Resultat estime :
Pente moyenne : 7,47 deg | Variable 4

 Pente (degres)

Echelle



Approx. 1:11 000

Source : IGN LIDAR HD (2022-2024) - Classification ASPRS

Auteur : Mihai Gaina - M1 G2M Paris 8

Cours : Gestion de projet LIDAR - M. Nowak - 24/04/2026

Carte 2 - Hauteur nDSM & cimes d'arbres

$nDSM = MNS - MNT + maxima\ locaux\ (ITD \geq 5\ m)$

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Legende

Resultat estime :

19 884 cimes estimees | Variable 3

Hauteur nDSM

0 m 50 m

● Cime d'arbre ($\geq 5\ m$)

Echelle



Approx. 1:11 000

Source : IGN LIDAR HD (2022-2024) - Classification ASPRS

Auteur : Mihai Gaina - M1 G2M Paris 8

Cours : Gestion de projet LIDAR - M. Nowak - 24/04/2026

Carte 3 - Canopée végétale par hauteur moyenne


Polygones classe 5 LAS - rampe verte = hauteur nDSM

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Legende

Resultat estime :
1,273 km2 (31,8%) - H.moy 10,93 m | Variables 1&2

 **H. moyenne canopee (m)**
0 m 38 m

Echelle


0 250 500 750 1 km

Approx. 1:11 000

Source : IGN LIDAR HD (2022-2024) - Classification ASPRS

Auteur : Mihai Gaina - M1 G2M Paris 8

Cours : Gestion de projet LIDAR - M. Nowak - 24/04/2026

Carte 4 - Bati par hauteur moyenne

Polygones classe 6 LAS - rampe rouge = hauteur nDSM

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Legende

Resultat estime :
881 polygones - 0,648 km2 (16,2%) - H.moy 4,92 m | Vars 5/6/7



Echelle



Approx. 1:11 000

Source : IGN LIDAR HD (2022-2024) - Classification ASPRS

Auteur : Mihai Gaina - M1 G2M Paris 8

Cours : Gestion de projet LIDAR - M. Nowak - 24/04/2026

Carte 5 - Synthèse structurale : canopée + bâti + MNT

Superposition végétation (classe 5) + bâti (classe 6) sur MNT

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km



Carte 6 - Priorite vegetalisation (Suitability Map)

Modele conceptuel ESRI - 5 criteres LiDAR + zones ANRU (35/25/15/10/15)

EPSG:2154 Lambert-93 | Grigny (91) | 2x2 km

