

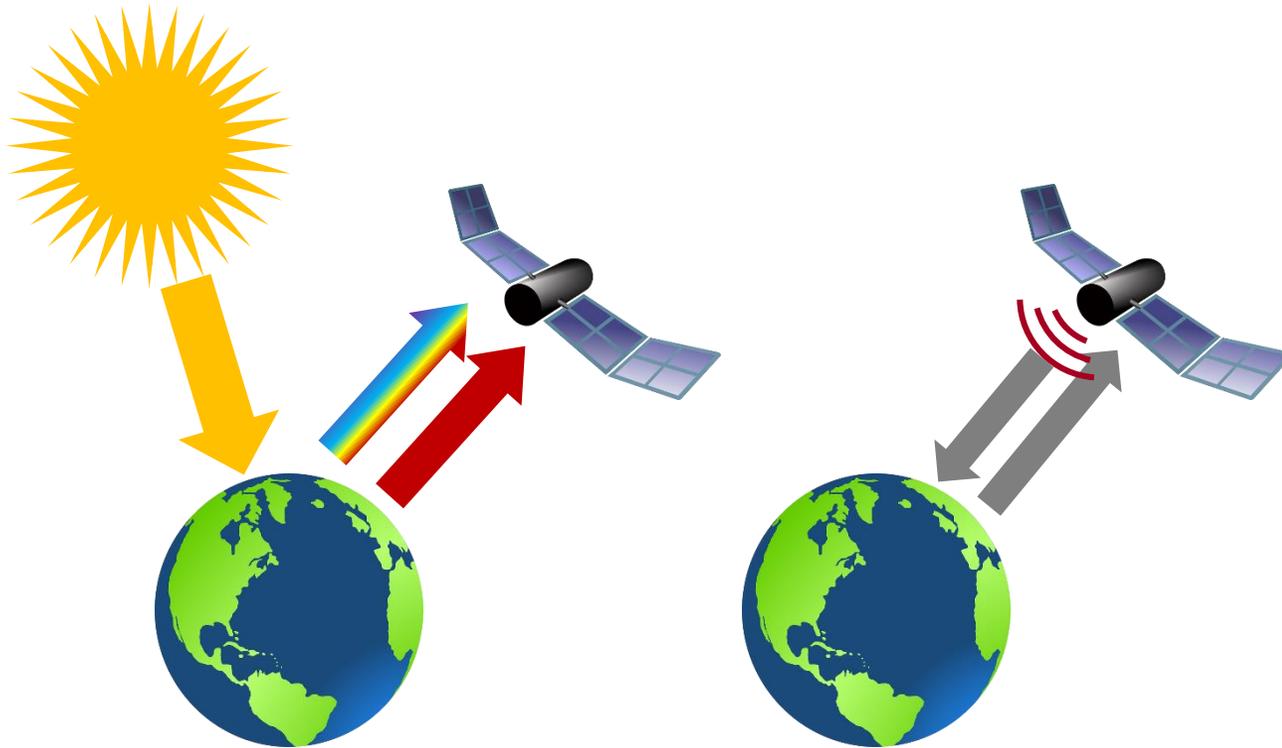
## L'observation en 3D par Lidar : potentiel et limites pour caractériser la structure des milieux terrestres

**Sylvie DURRIEU**

[sylvie.durrieu@inrae.fr](mailto:sylvie.durrieu@inrae.fr)

# Qu'est-ce que le lidar ?

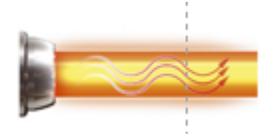
- Lidar = Light Detection And Ranging
- Technologie d'observation par un **système actif** basé sur l'émission-réception d'un **faisceau laser**



Télédétection passive

Télédétection active  
(radar, lidar)

- Lumière laser
  - ▶ Monochromatique
  - ▶ Unidirectionnelle
- Transmet à grande distance une énergie qui se disperse peu => forte puissance du signal transmis



# Cadrage de la présentation

## Ce dont on va parler

- Les lidars dits topographiques ou télémètres (« range finders ») à temps de vol
- Les lidars aéroportés (ALS)
- La caractérisation de la topographie et de la végétation naturelle

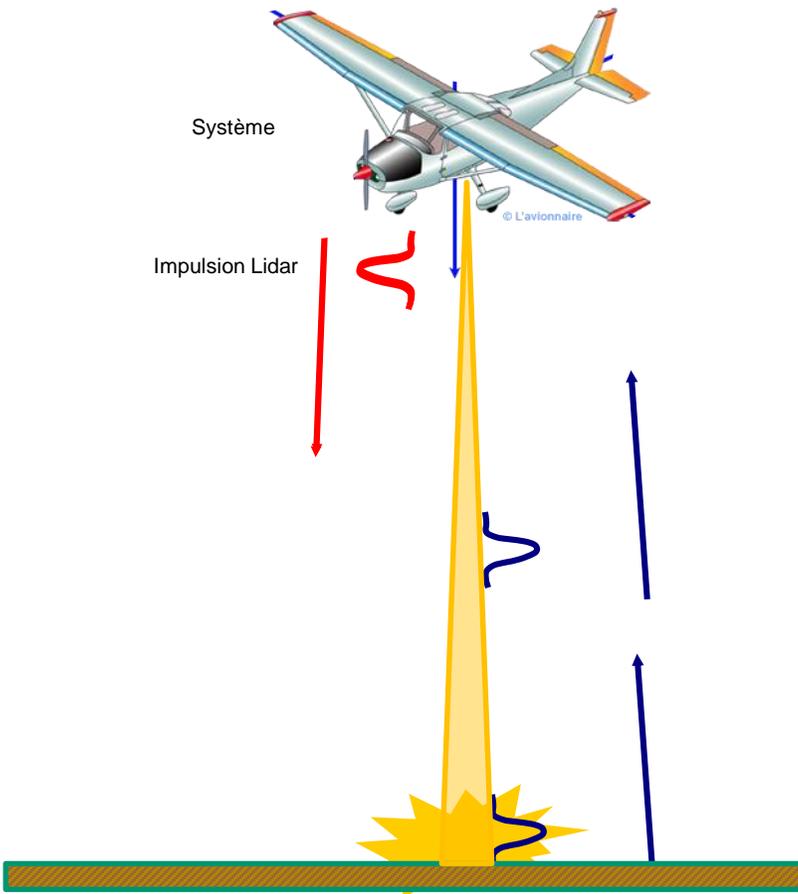
## Ce dont on ne va pas parler

- Les lidars à différence de phase (mesure de distance)
- Les autres types de lidars
  - A absorption différentielle (atmosphère)
  - A fluorescence (chlorophylle, photosynthèse)
  - Doppler (mesure de vitesse)
- Les lidar terrestres (TLS) & spatiaux
- La caractérisation du bâti, des cultures et des milieux aquatiques

# Plan de la présentation

1. Principe de fonctionnement du Lidar topographique
2. Caractéristiques des données acquises
3. Produits dérivés des nuages de points 3D et leur intérêt pour l'étude des milieux terrestres
4. Limites et perspectives

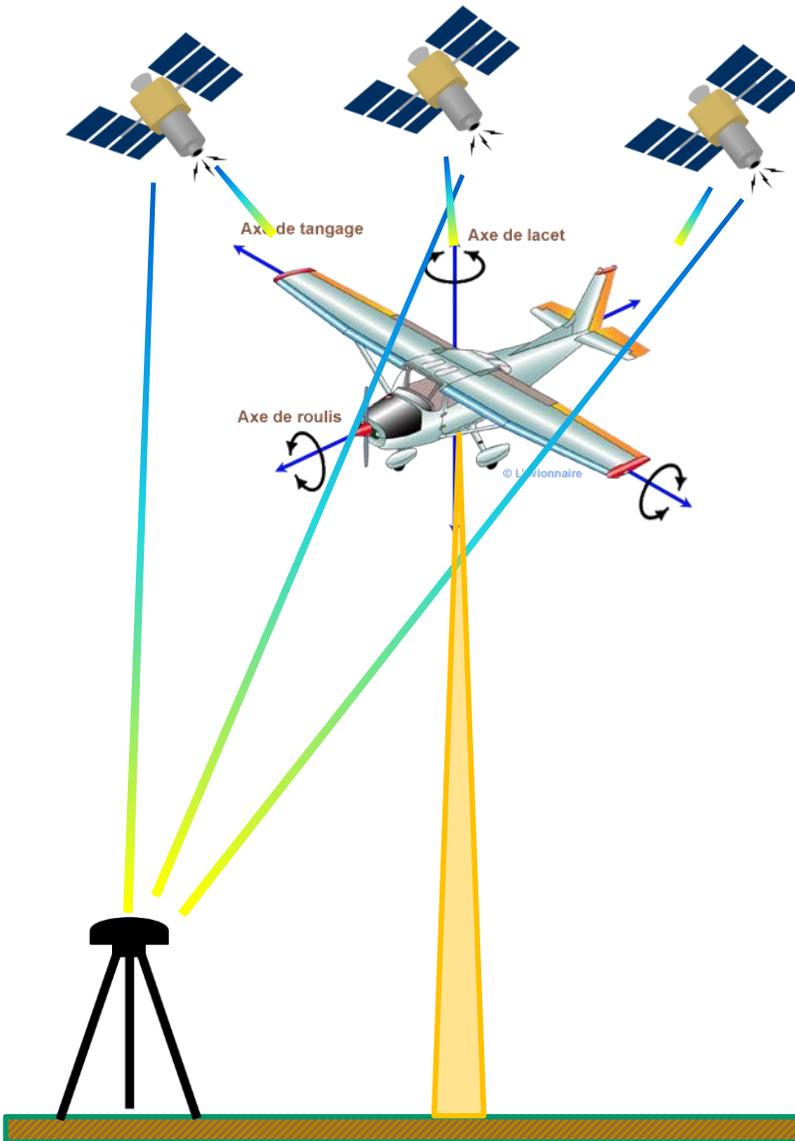
# Principe de la mesure par Lidar aéroporté topographique



- Mesure du temps de parcours d'une impulsion laser (PIR)  
→ distance système / cible

$$d = \frac{c \cdot \Delta T}{2} \quad \text{avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

# Principe de la mesure par Lidar aéroporté topographique

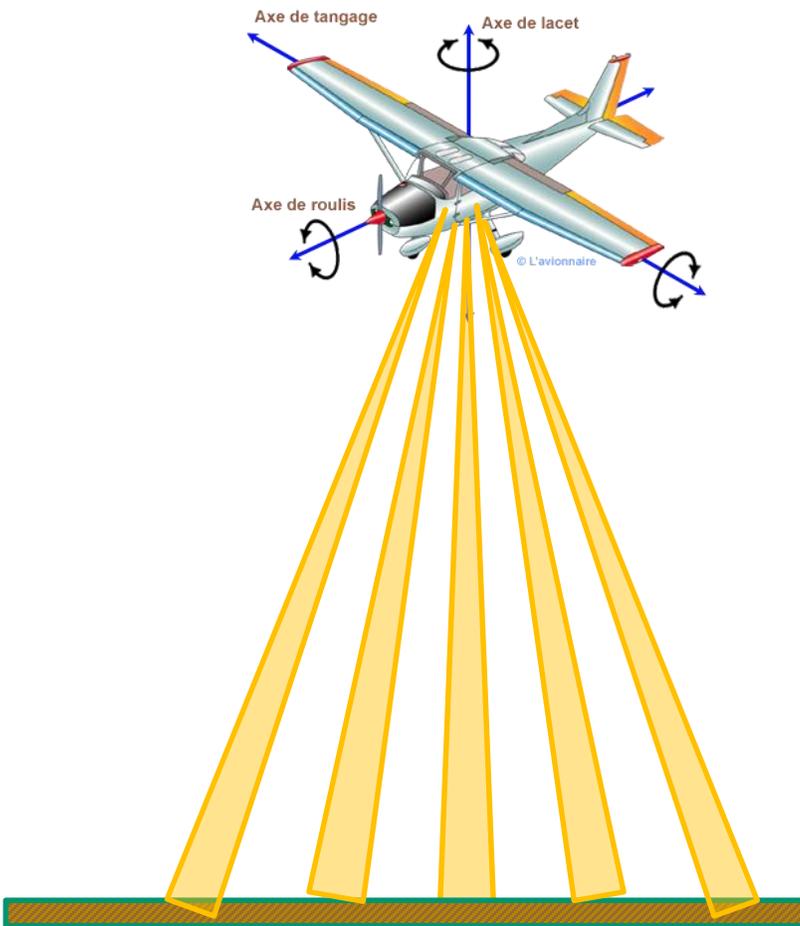


- Mesure du temps de parcours d'une impulsion laser (PIR)  
→ distance système / cible

$$d = \frac{c \cdot \Delta T}{2} \quad \text{avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- Mesure de la position et de l'orientation du système (DGPS + IMU)  
→ position absolue de la cible

# Principe de la mesure par Lidar aéroporté topographique

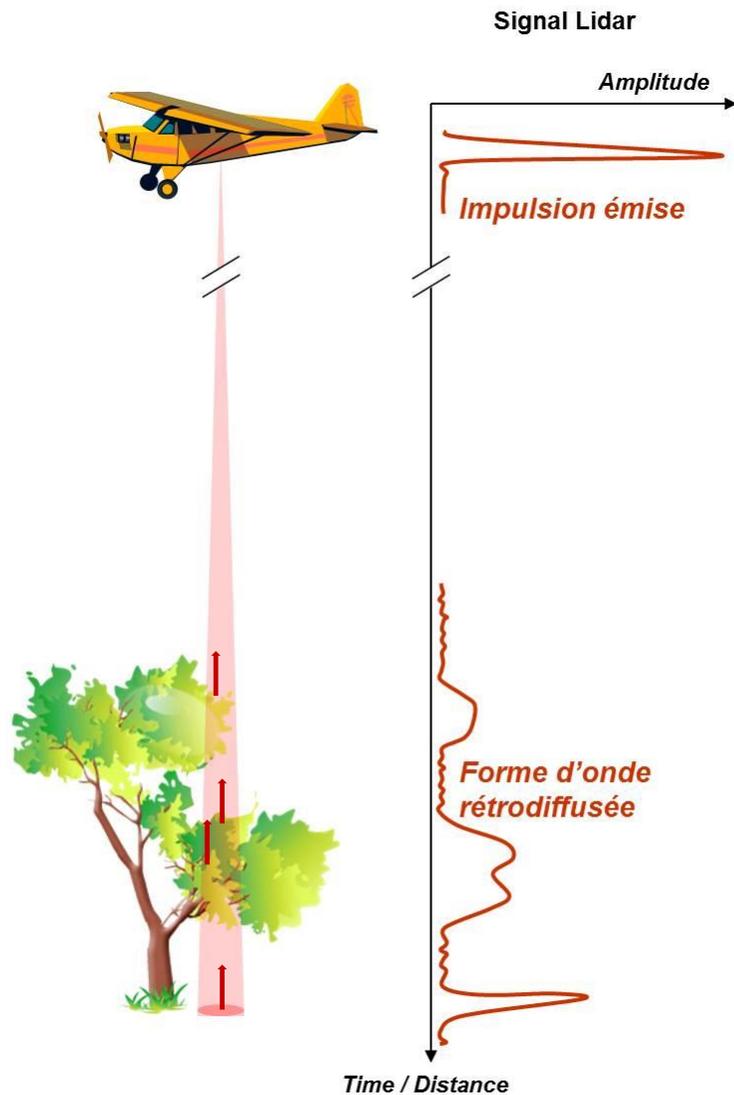


- Mesure du temps de parcours d'une impulsion laser (PIR)  
→ distance système / cible

$$d = \frac{c \cdot \Delta T}{2} \quad \text{avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- Mesure de la position et de l'orientation du système (DGPS + IMU)  
→ position absolue de la cible
- Système à balayage : spatialisation des mesures

# Le signal Lidar



Crédit : S. Durrieu- Irstea

Forme temporelle du signal retour = forme d'onde

- De l'impulsion transmise
- Distribution verticale des cibles
  - ▶ Superposition des échos à différentes distances
  - ▶ Atténuation de l'intensité par les cibles précédentes
- Des caractéristiques des cibles
  - ▶ Géométriques (forme, orientation)
  - ▶ Physiques (nature et rugosité)

=> réflectance

} => Amplitude et largeur des pics
- Facteur de transmission atmosphérique ( $\eta_{atm}$ )

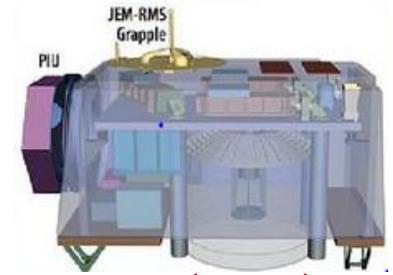
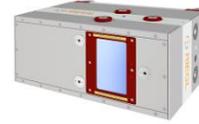
# Les différents systèmes Lidar

- Dépendent de la plateforme

RIEGL VUX-1LR  
22.7 x 18 x 12.5 (cm)  
3.5 kg

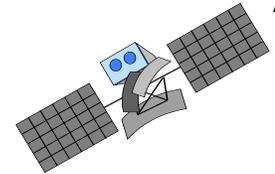
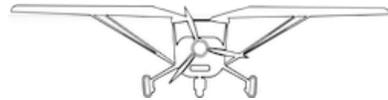


RIEGL VQ-780 II  
42.5 x 21.2 x 33.1 (cm)  
20 kg



Télescope ~ 0.7 m

Altitude croissante



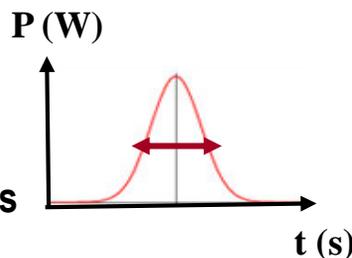
- Les propriétés du faisceau émis

► Longueur d'onde

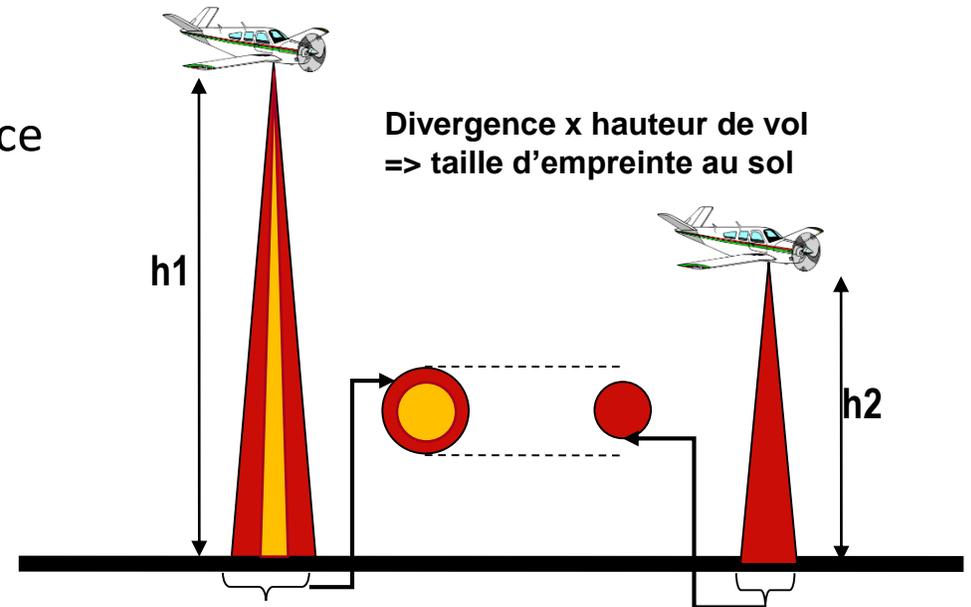
- ≡ UV (355 nm)
- ≡ Vert (532 nm)
- ≡ PIR (1064 nm - 1550 nm)

► Energie et durée de l'impulsion

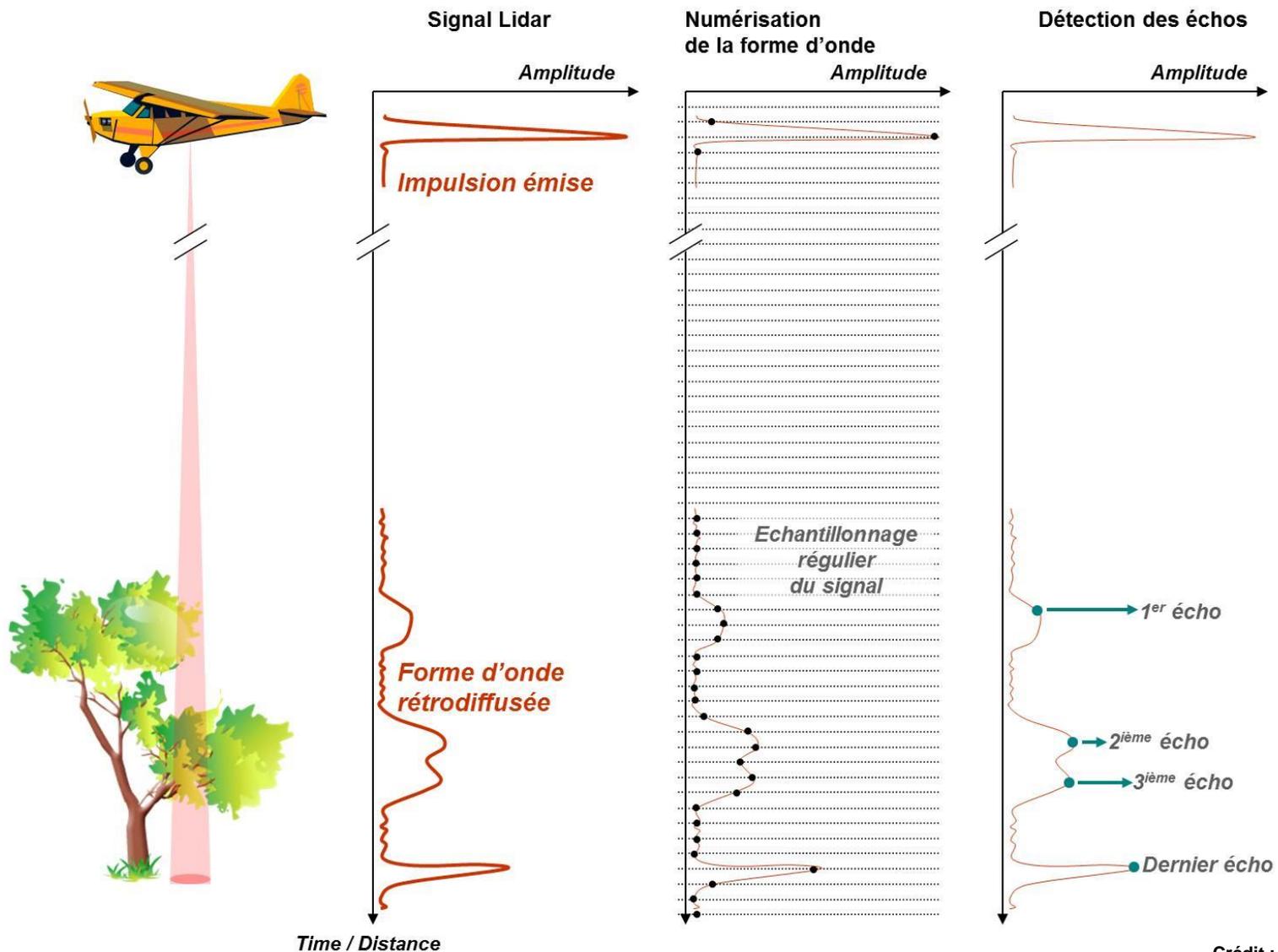
FWHM = 6 - 14 ns  
~ 1,8 à 4,2 m



► Divergence



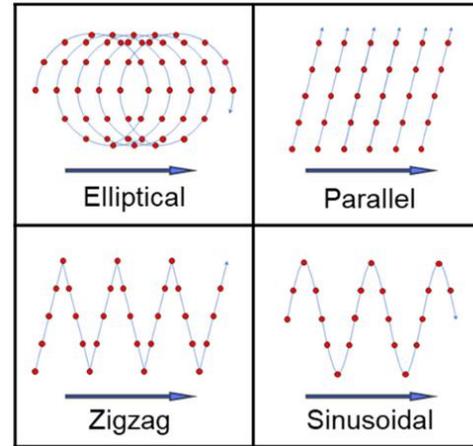
# Les différents systèmes Lidar : le type de récepteur



Crédit : S. Durrieu- Irstea

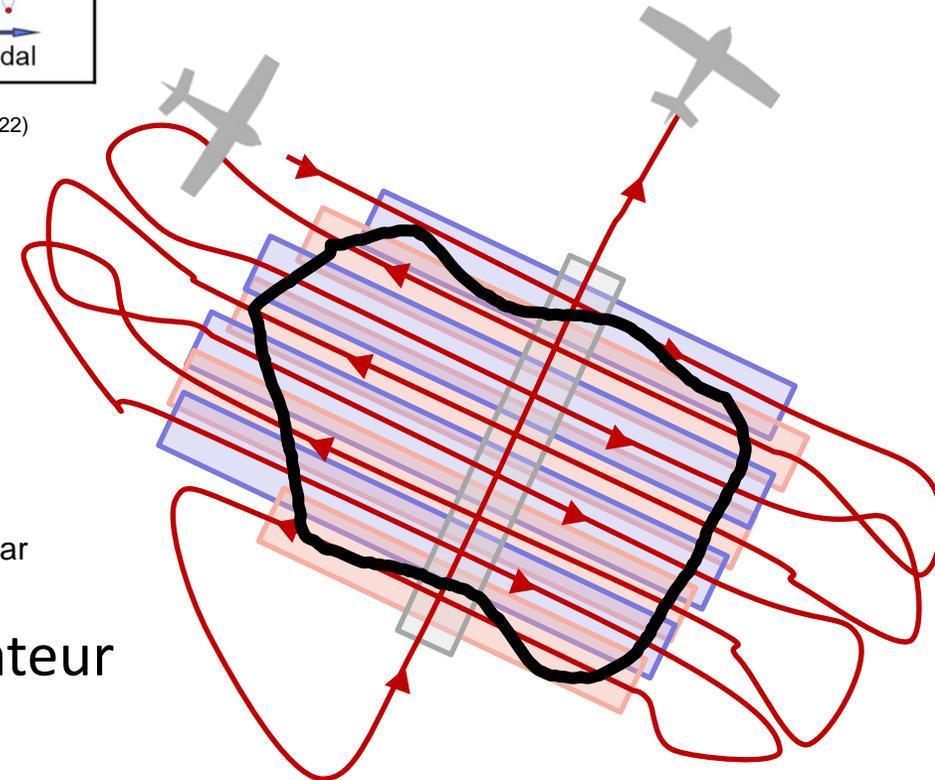
# La spatialisation des mesures: différents facteurs

- Fréquence des impulsions > 2000 kHz
- Système à balayage
  - ▶ Type => « Scan pattern »
  - ▶ Fréquence (> 100 Hz)
  - ▶ Angle de scan maximum
- Vitesse du vecteur
- Plan de vol => Nombre de mesures /m<sup>2</sup>
- Paramètres optimisés pour répondre à la demande utilisateur



©Lin et al. (Remonte Sensing, 2022)

Densité et distribution des mesures sur une ligne de vol



# Prétraitement des données Lidar

## 1- Extraction des échos (points) si données FW

- ▶ Nombre et position des échos
- ▶ Amplitude, largeur , ...
  - ≡ Lien avec la nature des cibles

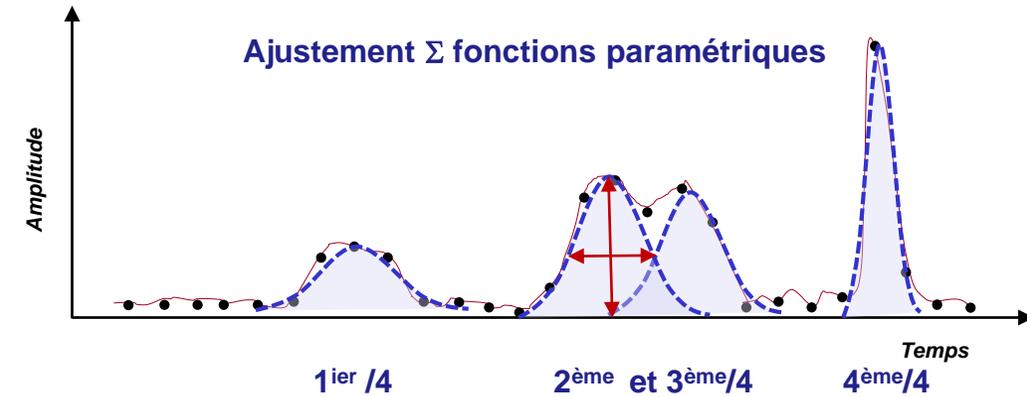
## 2- Géoréencement des points

- ▶ Données en géométrie capteur + Trajectoire (DGPS) + Orientation du système (IMU)
- ▶ Transformations pour passer du référentiel capteur à un référentiel terrestre

## 3- Classification des points

- ▶ Algorithmes basés sur la géométrie
- ▶ Attribution d'une classe aux points
- ▶ Standard ASPRS

- Prétraitements réalisés par les prestataires
- Données livrées au format LAS/LAZ (ASPRS)



- 0 Created, Never Classified
- 1 Unclassified
- 2 Ground
- 3 Low Vegetation
- 4 Medium Vegetation
- 5 High Vegetation
- 6 Building
- 7 Low Point (Noise)
- 8 Model Key-Point (Mass Point)
- 9 Water
- 10- 31 Reserved for ASPRS Definition

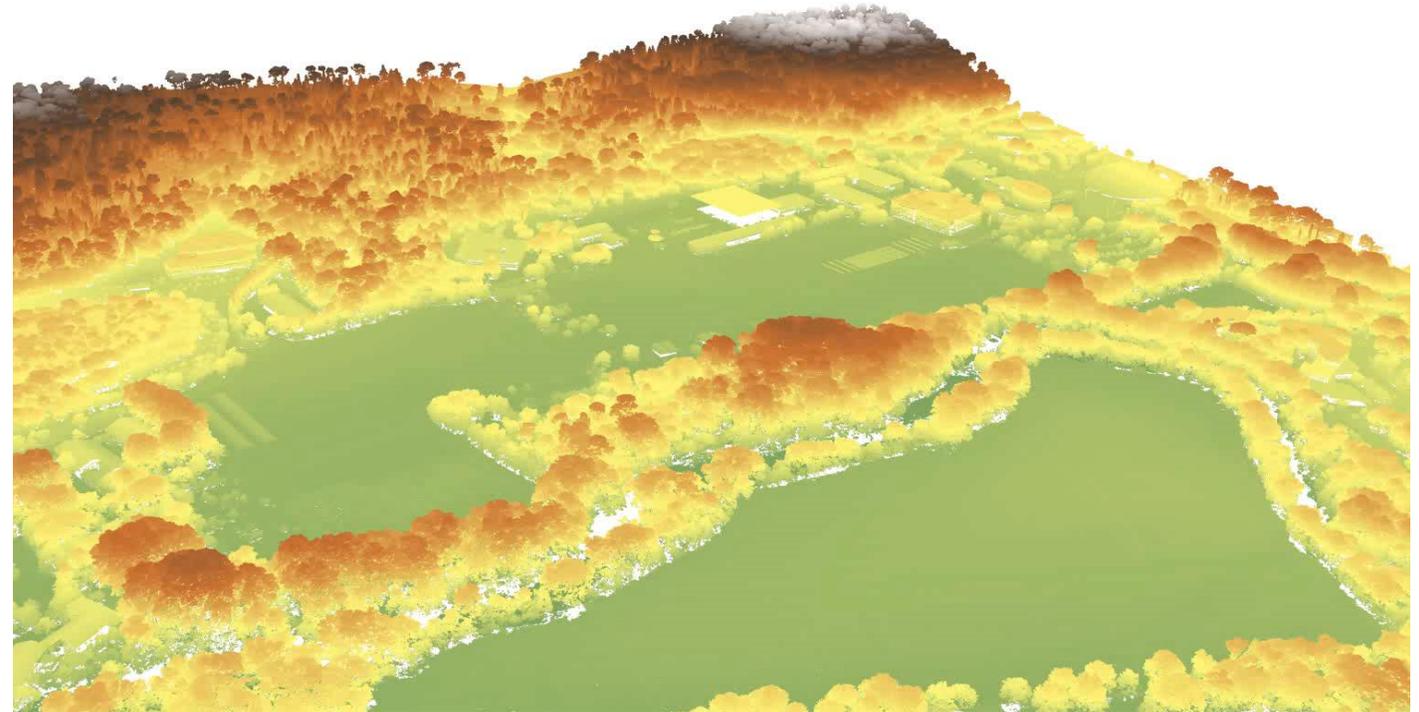
# Plan de la présentation

1. Principe de fonctionnement du Lidar topographique
2. Caractéristiques des données acquises
3. Produits dérivés des nuages de points 3D et leur intérêt pour l'étude des milieux terrestres
4. Limites et perspectives

# Les données Lidar : des nuages de points 3D



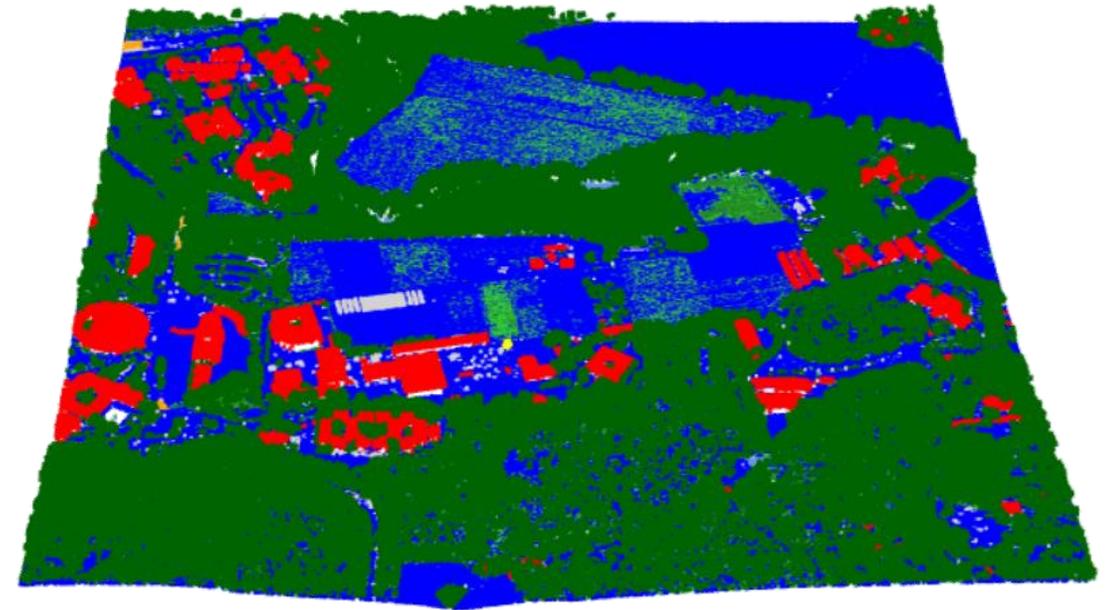
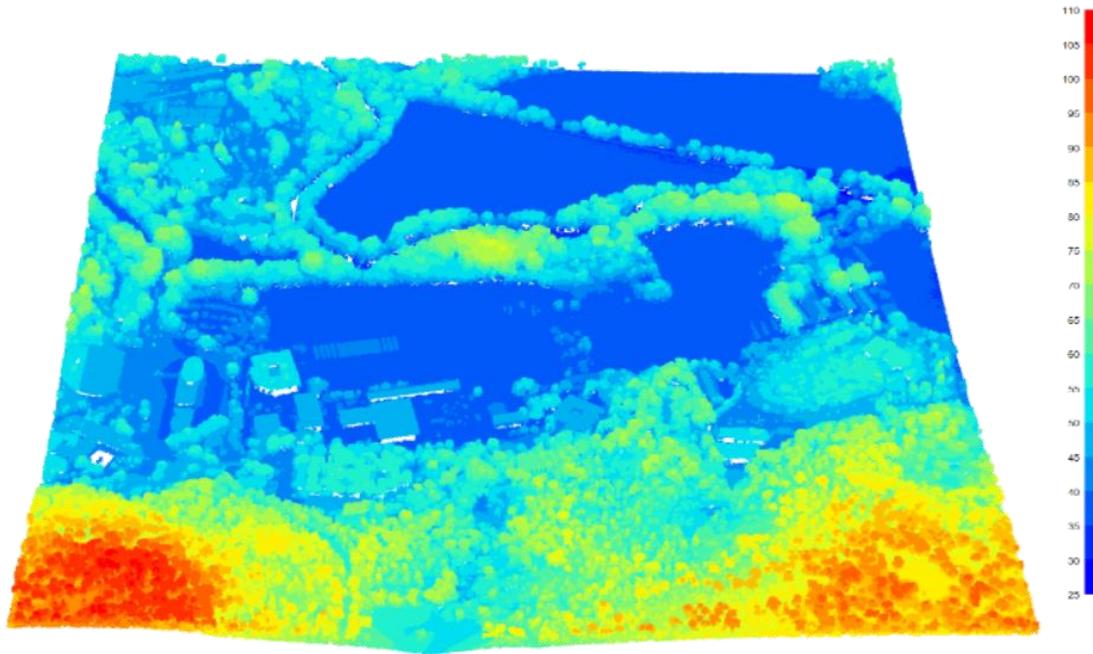
Tuile Lidar HD IGN  
(1 km x 1 km)



Précision en Z : ~ 10 -15 cm (qqes cm en distance)

Précision planimétrique (X,Y) : ~ 50 cm à 1000 m

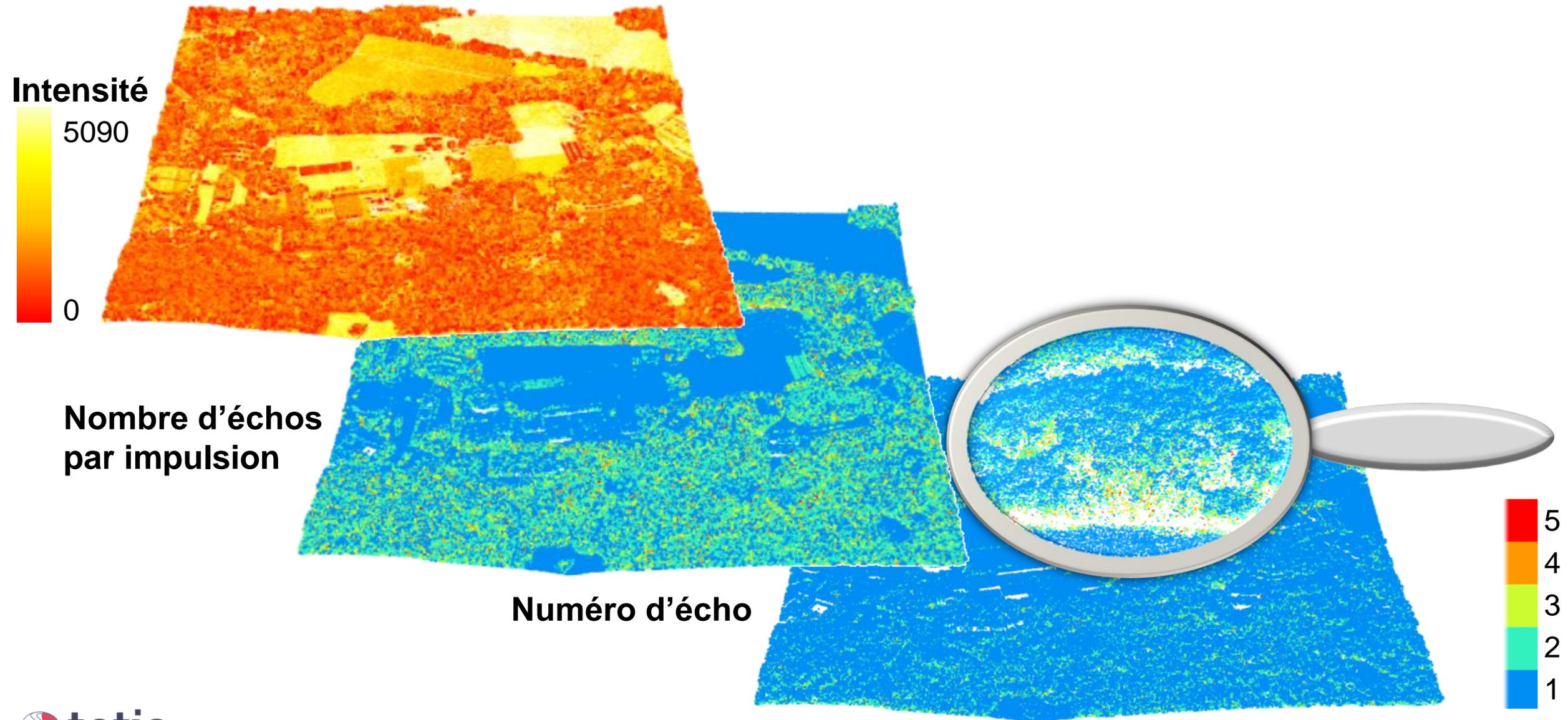
# Les données Lidar: des nuages de points avec attributs



1<sup>ère</sup> information importante = élévation (Z)  
=> 3<sup>ème</sup> dimension

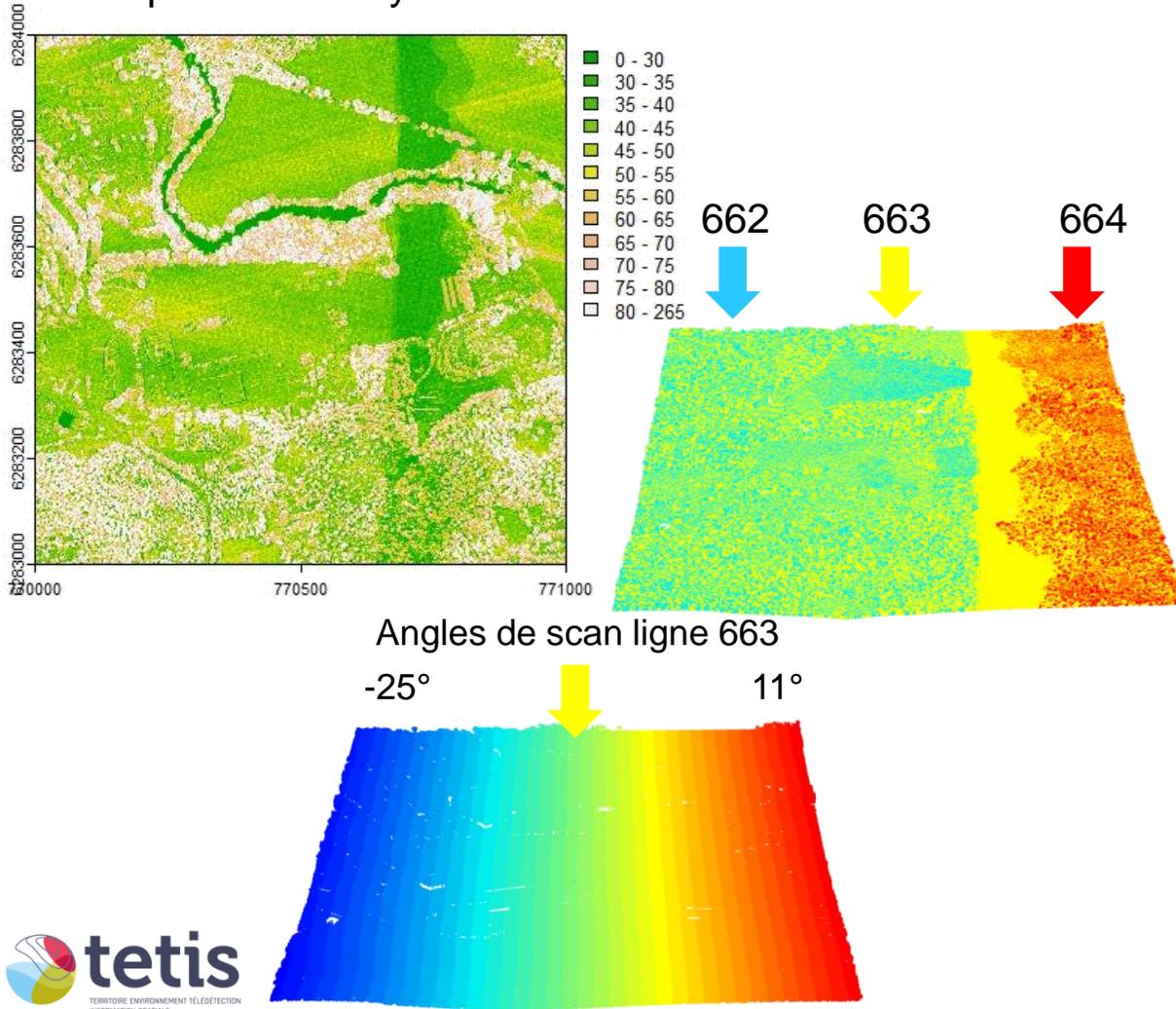
- 1 - Non classé
- 2 - Sol
- 3 - Végétation basse 0-0,5 m
- 4 - Végétation moyenne 0,5-1,50 m
- 5 - Végétation Haute > 1,5 m
- 6 - Bâtiment
- 9 - Eau
- 65- Artefact

# Les données Lidar: des nuages de points avec attributs

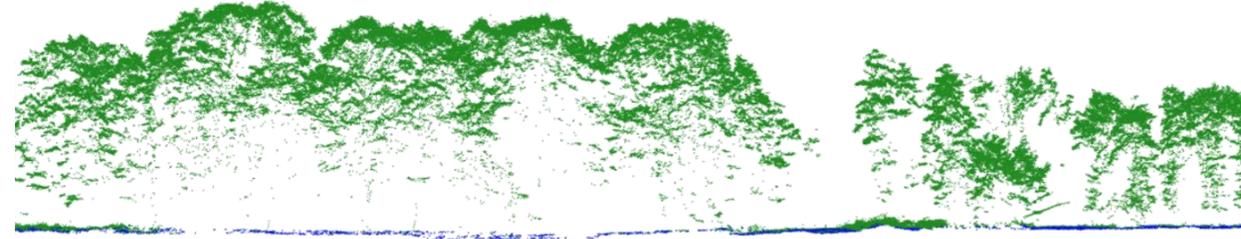


# Les données Lidar: des spécificités à noter

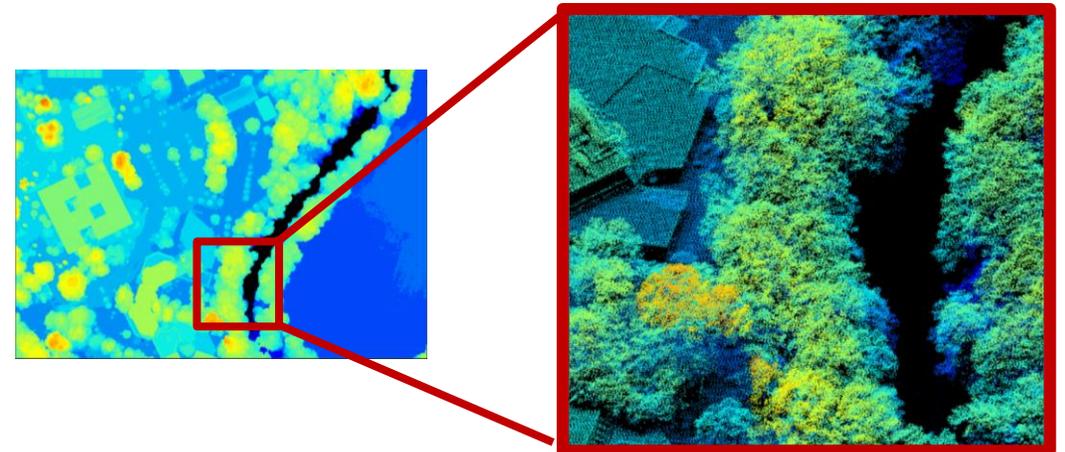
- Echantillonnage irrégulier (redondance ou trous)
  - Densité de points et angles de scan variables
- 55 pts/m<sup>2</sup> en moyenne



- Atténuation de l'information du sommet de la canopée vers le sol (irrégularité en Z)



- Pas de données sur les milieux aquatiques



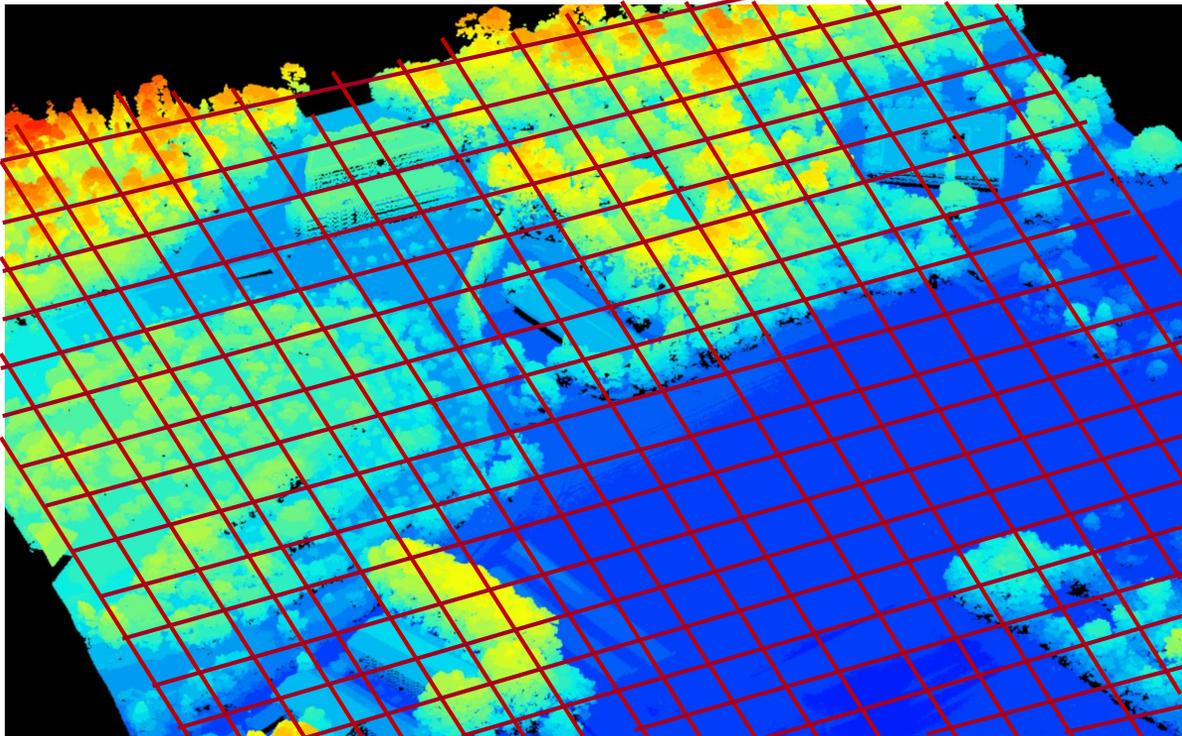
- ▶ Lidar bathymétrique ou topo-bathymétrique (vert pour pénétrer dans l'eau)

# Plan de la présentation

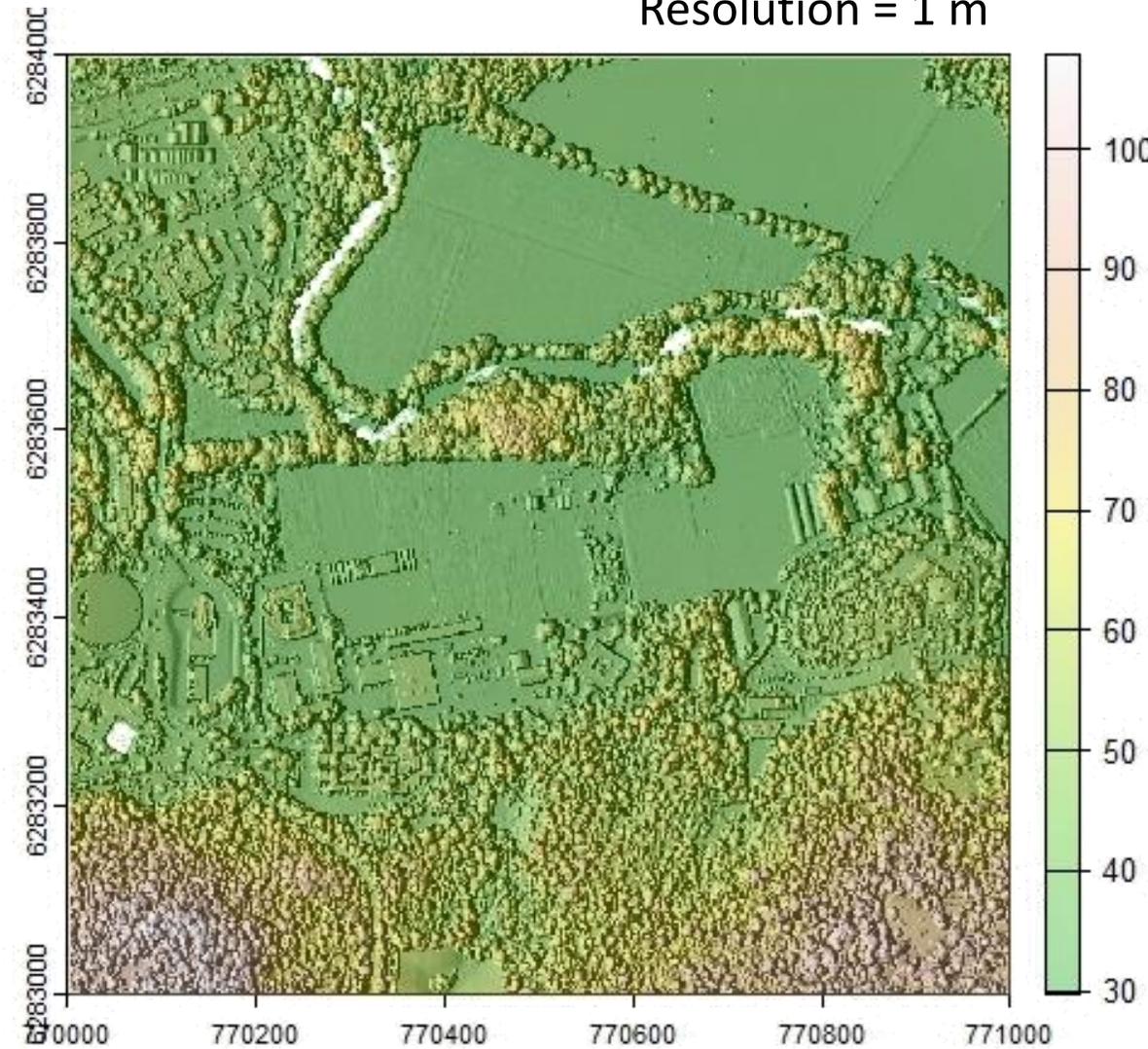
1. Principe de fonctionnement du Lidar topographique
2. Caractéristiques des données acquises
3. Produits dérivés des nuages de points 3D et leur intérêt pour l'étude des milieux terrestres
4. Limites et perspectives

# Produits dérivés standards : le MNS

- Création d'un MNS

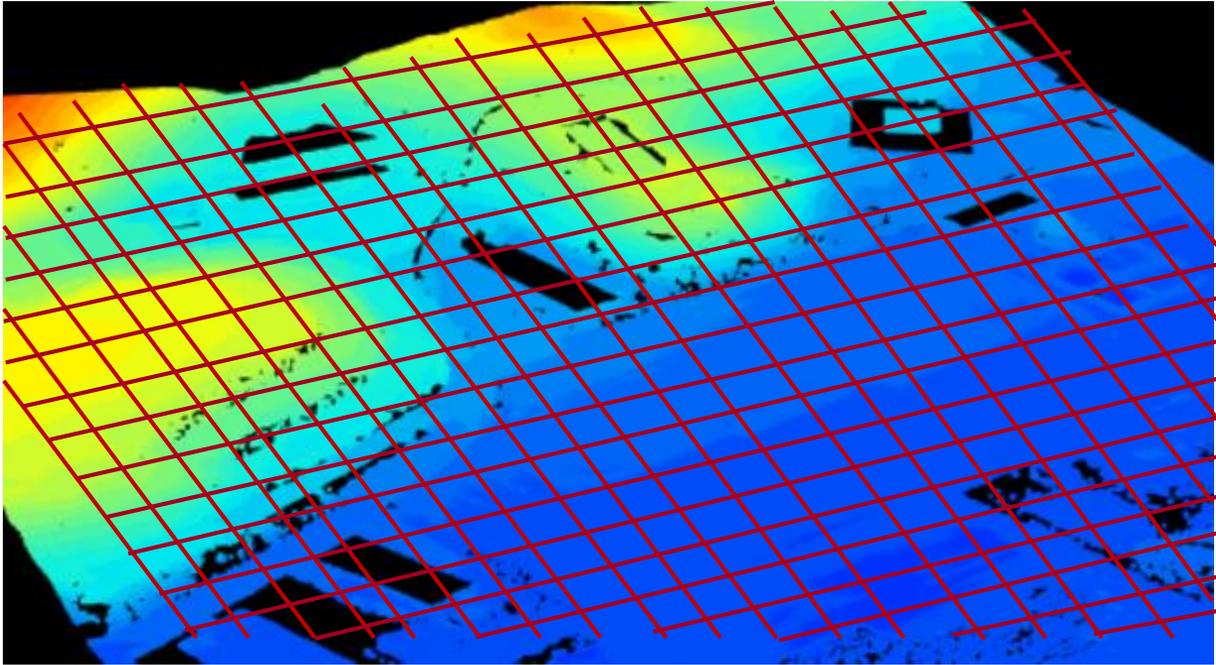


Résolution = 1 m

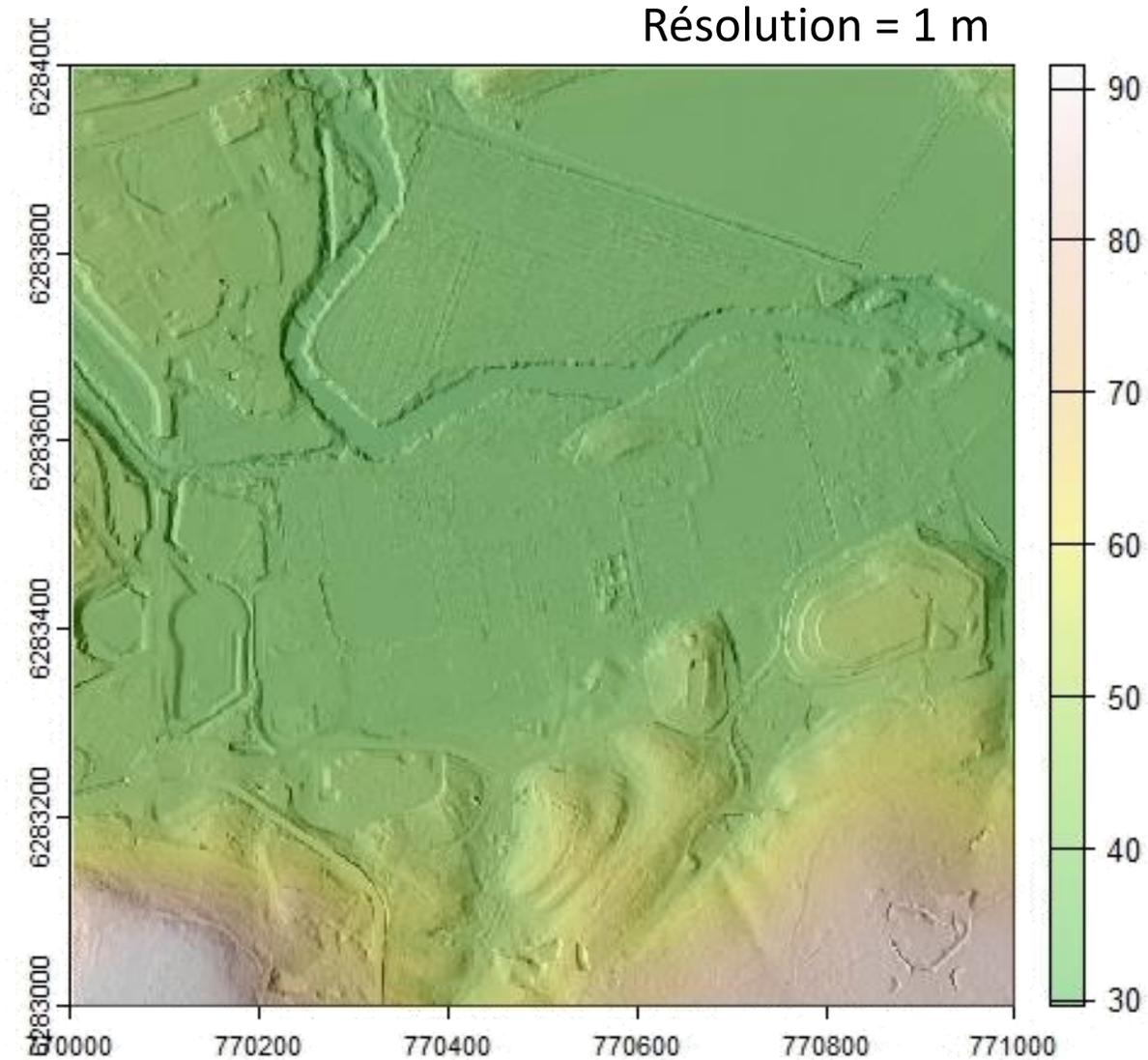


# Produits dérivés standards: le MNT

- Création d'un MNT à partir des points classés sol



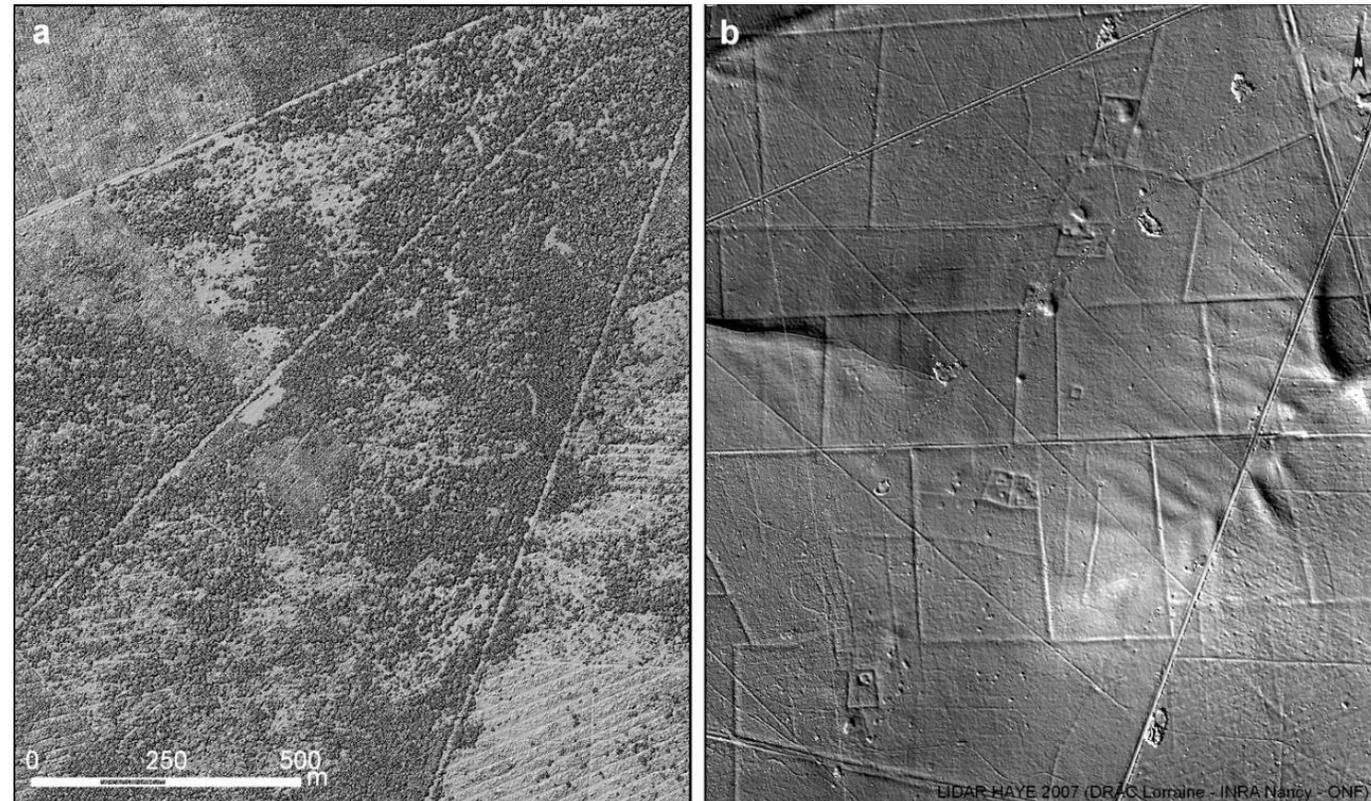
- ➡ Affectation d'une valeur par maille de la grille
- ➡ Interpolation si données manquantes



# Intérêt des MNT issus du Lidar

- Des données là où la photogrammétrie ne fonctionne pas
  - ▶ Sous couvert forestier
  - ▶ Sur milieux homogènes en terrain plat
- Caractérisation de la topographie et « microtopographie » (e.g. fossés, replats de pistes)
  - ▶ Pentes, orientations à différentes échelles
  - ▶ Indices topographiques
  - ▶ **Utile pour caractériser**
    - ≡ Habitats
    - ≡ Microclimat
- Historique de l'occupation du sol
  - ▶ **Explication de la diversité floristique actuelle**

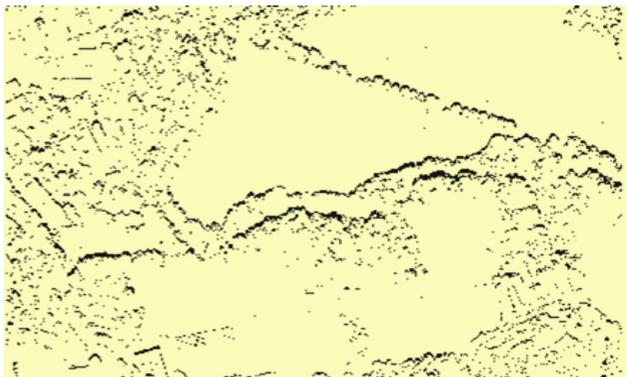
[Georges-Leroy et al., 2011]



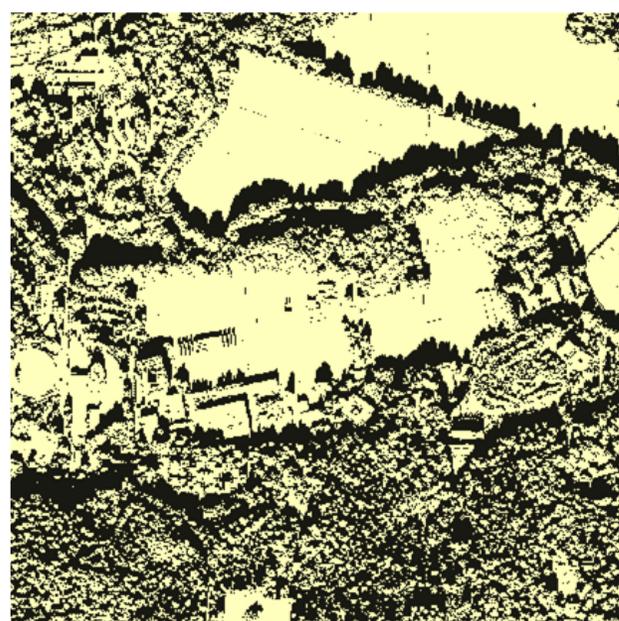
# Intérêt des MNS

## Calcul des zones à l'ombre, visibilité

01/07 - midi solaire

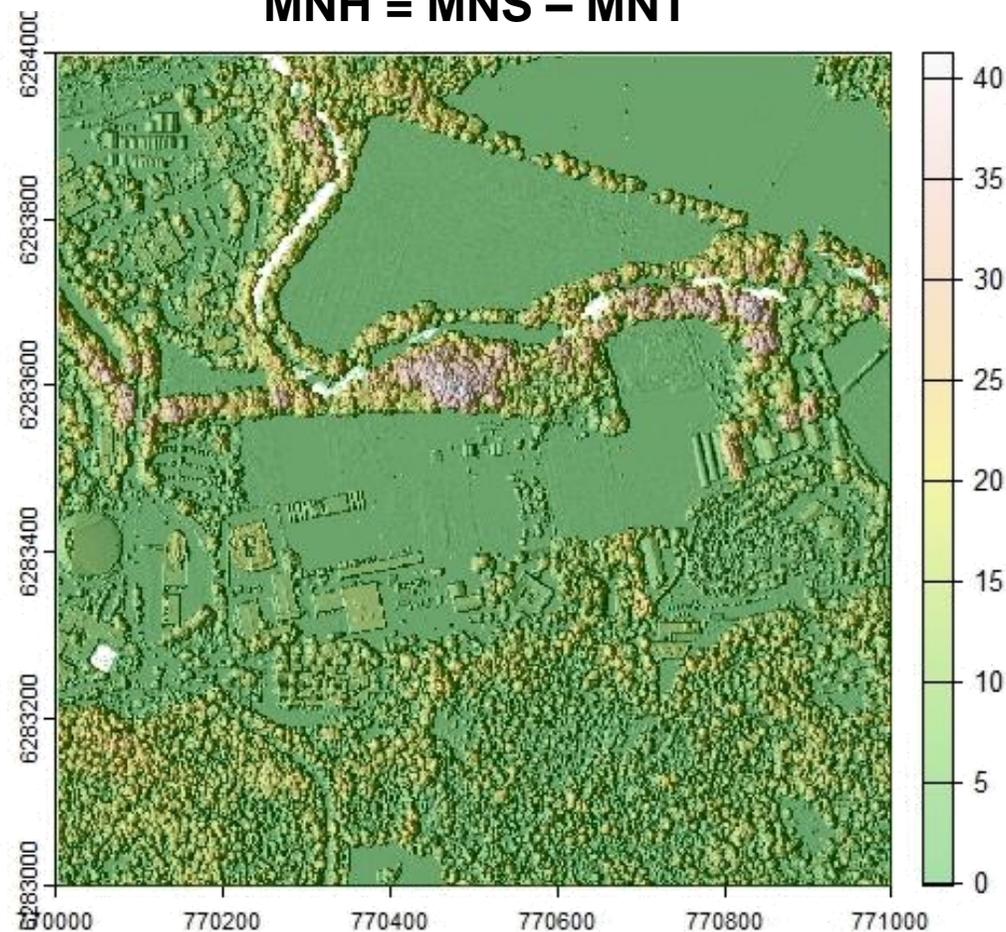


01/12 - midi solaire



## Calcul du MNH ou MNC → Carte de la hauteur du sursol

$$\text{MNH} = \text{MNS} - \text{MNT}$$



# Caractérisation de la structure de la végétation

Arbre



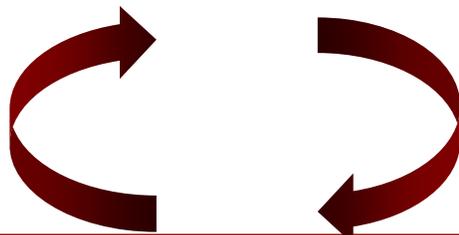
Peuplement



Paysage



Résultat



Moteur

## Fonctions écologiques des écosystèmes

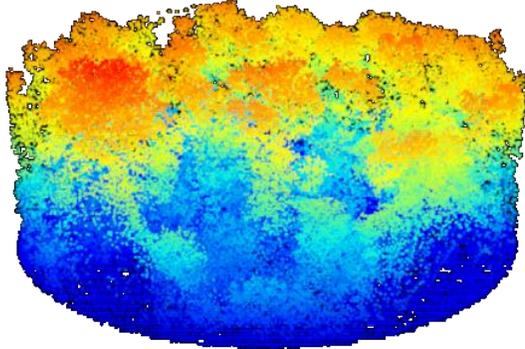
Stockage du carbone  
Cycles des nutriments  
Purification de l'eau et de l'air  
Maintien de la biodiversité

- La structure est une caractéristique intégrative
- Pouvoir la mesurer et caractériser sa dynamique donne accès au fonctionnement des écosystèmes
- Un enjeu pour de multiples disciplines
  - ▶ Foresterie opérationnelle : inventaire et gestion
  - ▶ Modélisation
    - ≡ Ecologie
    - ≡ Propagation des feux
    - ≡ Climatologie (macro et micro climat)

# Caractérisation de la structure de la végétation

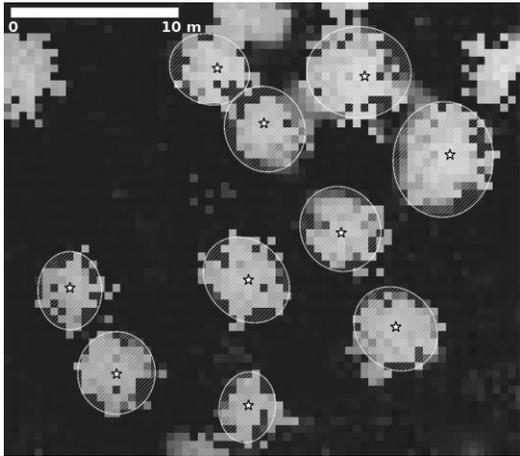


Source : <http://www.lfi.ch/>

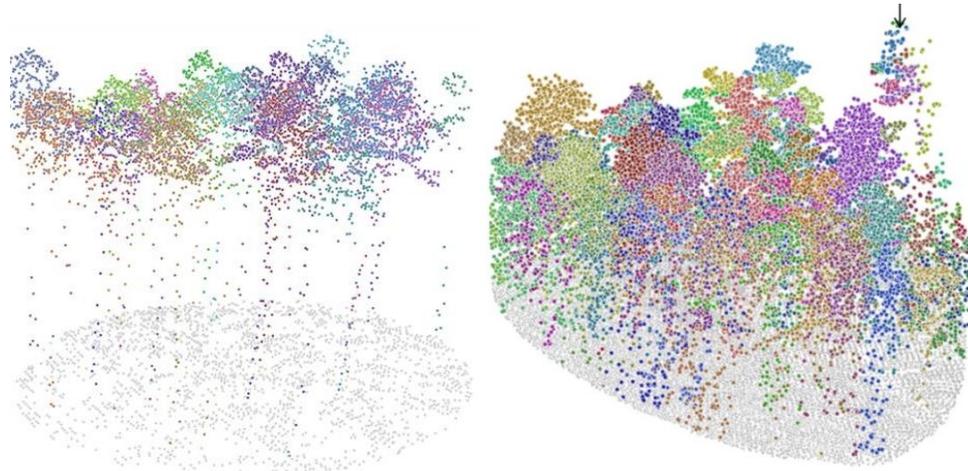


- Relevés terrain sont limités par
  - ▶ Coût élevé par unité de surface
  - ▶ Accessibilité (topographie, propriété)
  - ▶ La difficulté de certaines mesures
    - ≡ Positionnement des troncs
    - ≡ Mesure des hauteurs et de l'étendue des couronnes
    - ≡ Biais subjectifs liés à l'observateur
- Le lidar: meilleure technique de télédétection pour mesurer la structure en 3D de la végétation

# La structure de la végétation par Lidar - Approches à l'arbre



[Véga et Durrieu, 2011]

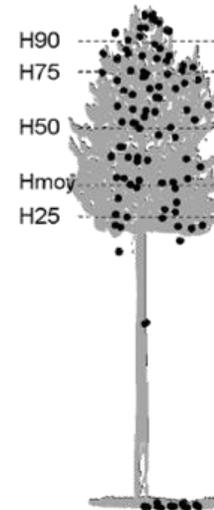
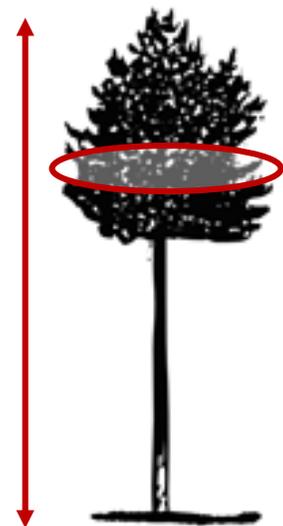
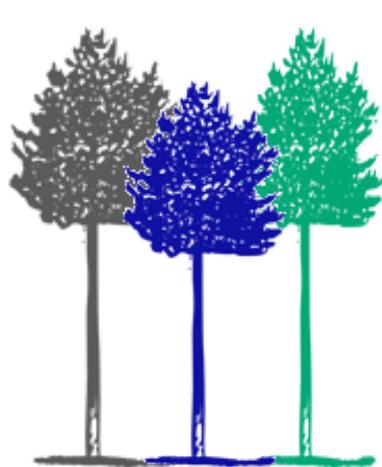


[Véga et al., 2014]

## Difficultés :

- Qualité de description varie selon taille et position des arbres  
=> défi pour les algorithmes
- Traitements lourds
- Bons résultats strate dominante

Intérêt: mesures directes de densité, hauteurs, diamètres de couronnes



Estimation par modèle : volume, biomasse, ...

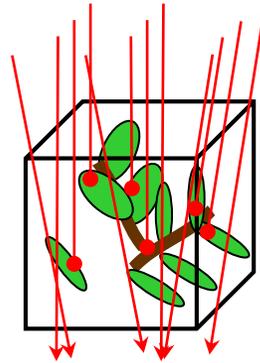
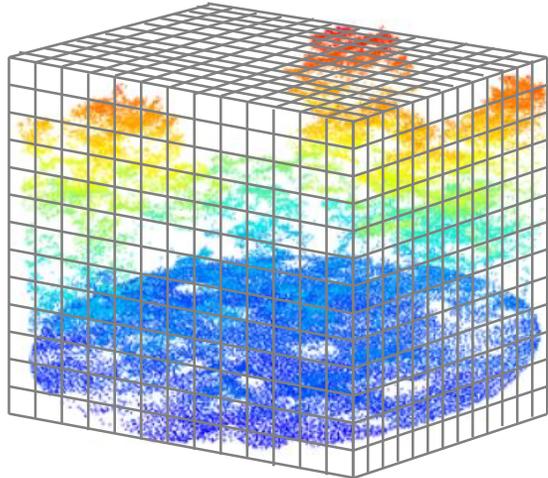
**Allométries existantes (Vol=f(Harbre))**

ou

$$\text{Vol} = f(I_{\text{str}_1}, I_{\text{str}_2}, I_{\text{str}_3}, \dots)$$

$$\text{AGB} = f(I'_{\text{str}_1}, I'_{\text{str}_2}, I'_{\text{str}_3}, \dots)$$

# La structure de la végétation par Lidar - La voxellisation



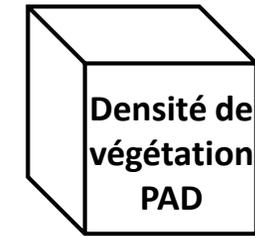
$$RDI = \frac{\text{Nb d'échos dans le voxel}}{\text{Nb de faisceaux entrants}}$$

= absorbance de la végétation

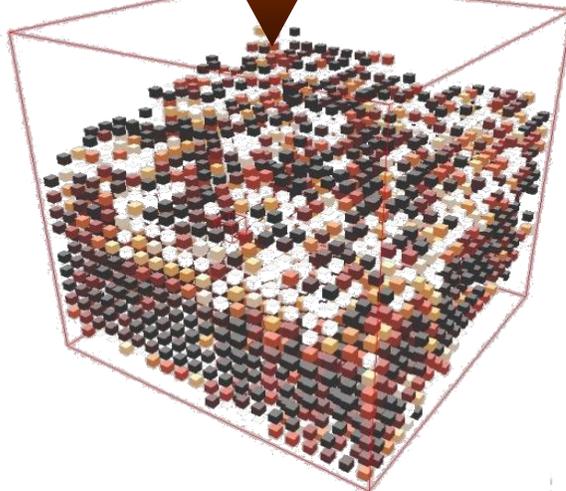


Loi de Beer-Lambert  
ou

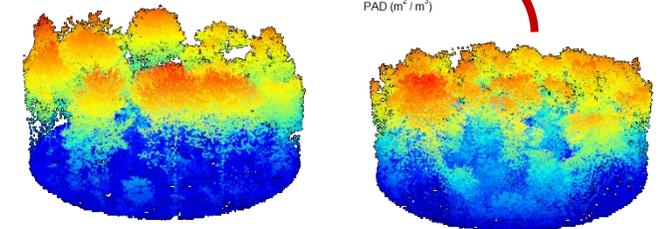
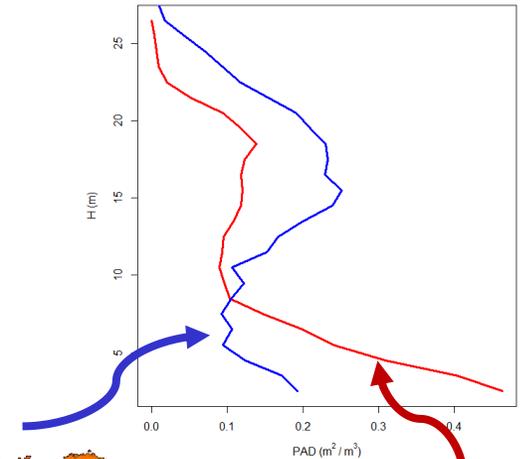
Estimateur du Maximum de Vraisemblance



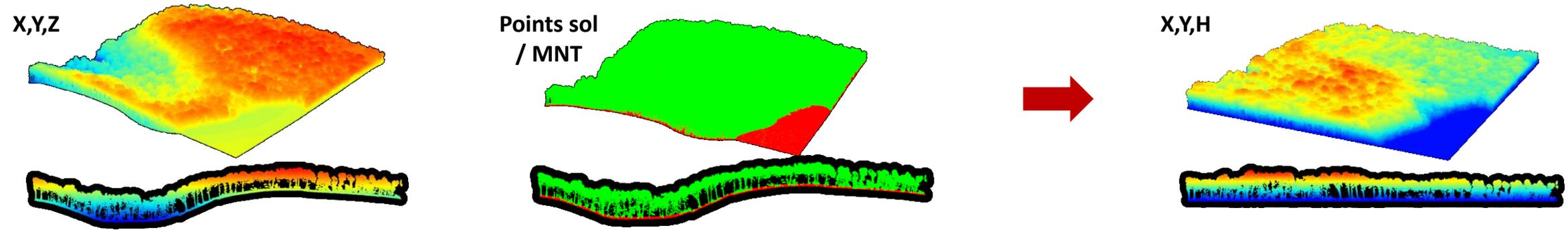
Information 3D résumée  
Volume de données réduit



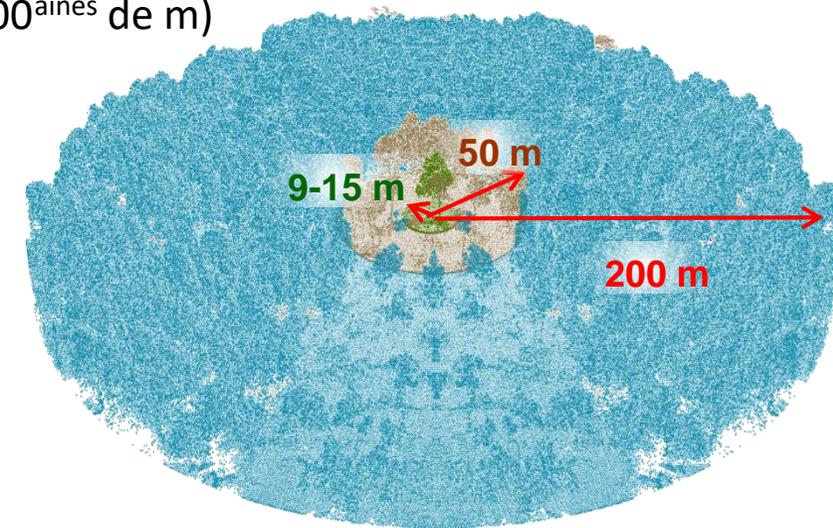
- Variables dérivées
  - ▶ Profil végétation (coef. variation)
  - ▶ Taux de couvert / Volume de la canopée
  - ▶ Trouées internes
  - ▶ ...
- Intérêt: normalise l'information / l'occlusion



# La structure de la végétation par Lidar - Approches « surfaciques »



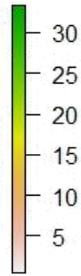
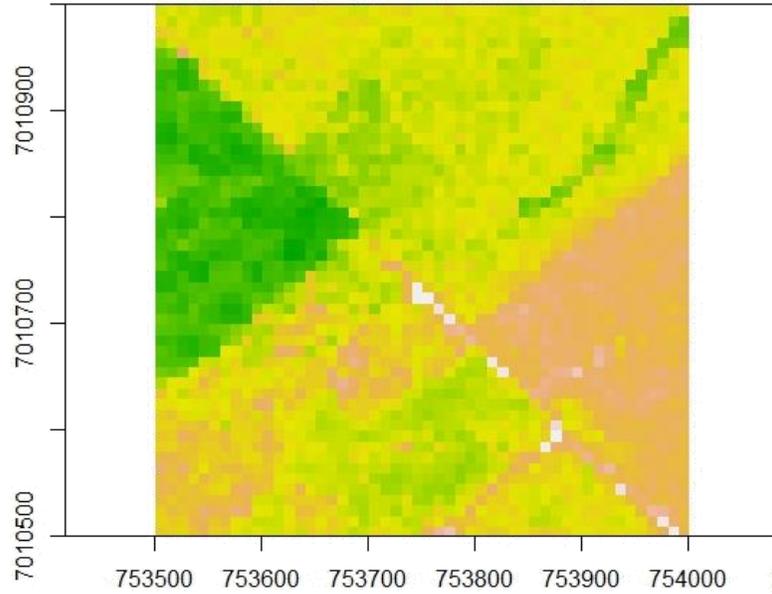
- Niveau peuplement : ensemble d'arbres
  - ▶ placettes de forme (cercle, carré...) et de taille variables (de 9 m à plusieurs 100<sup>aines</sup> de m)
- Variables dérivées du nuage de points de la placette
  - ▶ Distribution de la hauteur des points
    - ≃ Moyenne, max, min , variance de la hauteur
    - ≃ Percentile des hauteurs de points
    - ≃ Densité de points / strate
  - ▶ Distribution des intensités
  - ▶ Taux de couvert / Taux de trouées / Profils de densité de végétation
- Ajout possible de variables dérivées
  - ▶ Du MNC : rugosité du couvert (rumple index), volume de canopée.....
  - ▶ Des voxels , d'approches à l'arbre (e.g. caractéristiques houppiers arbres dominants)
  - ▶ Du MNT (topographie)



# La structure de la végétation par Lidar - Approches « surfaciques »

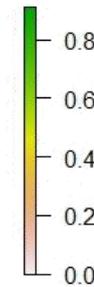
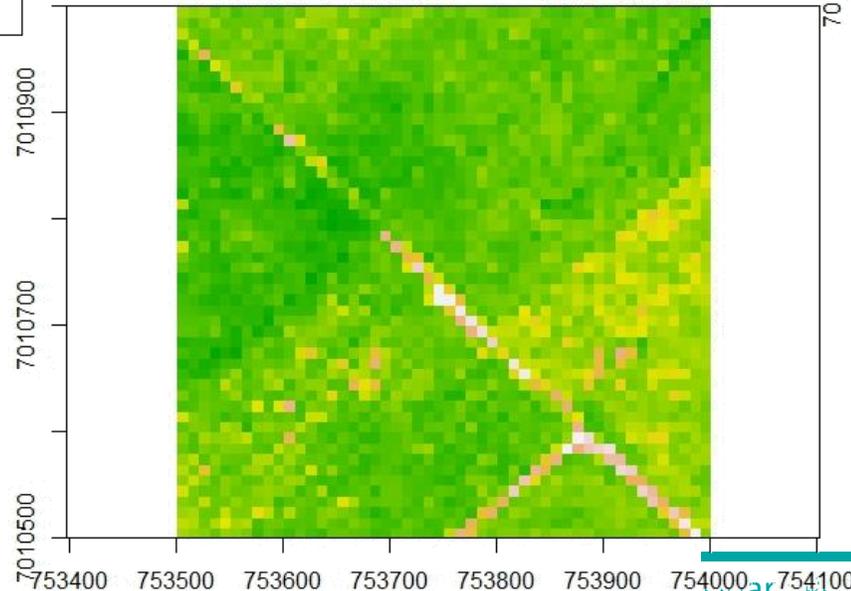
- Variables d'intérêt « direct » => cartes

Hmax

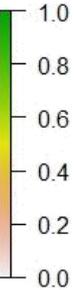
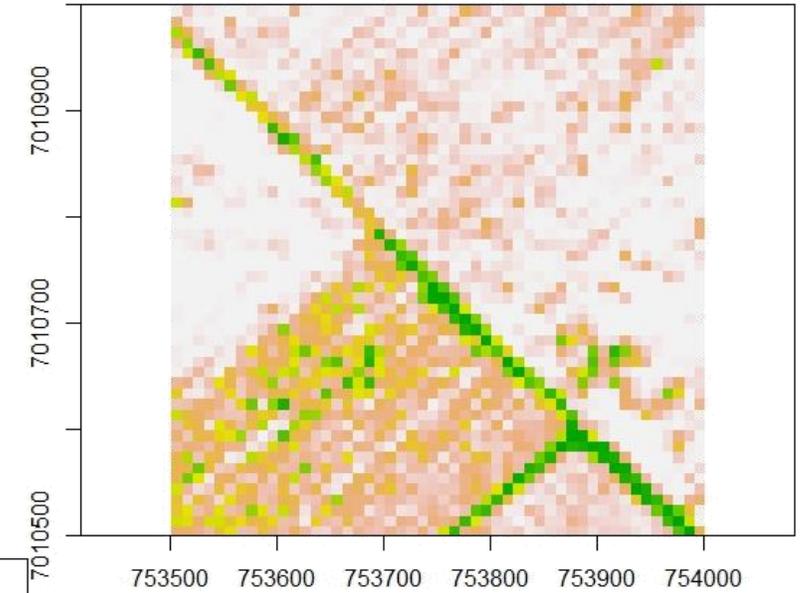


Exemples de cartes à  
10 m de résolution

Indice de complexité verticale

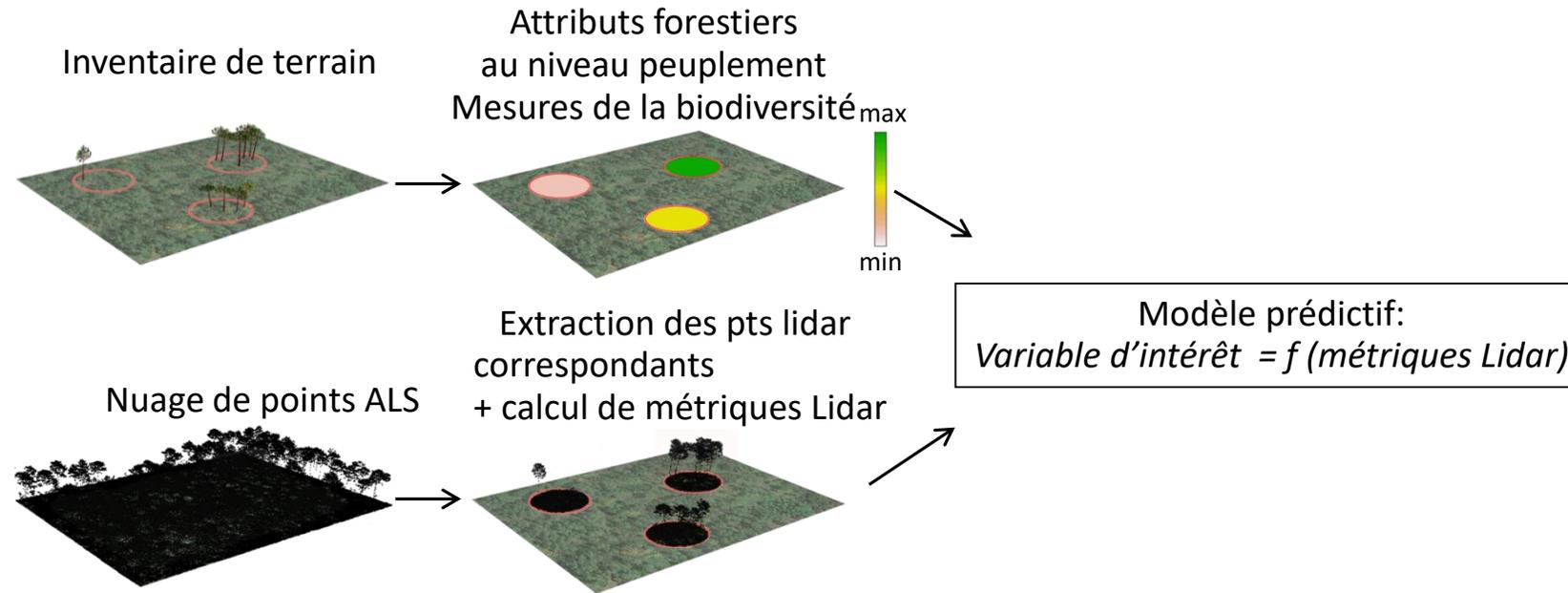


Taux de trouée



# La structure de la végétation par Lidar - Approches « surfaciques »

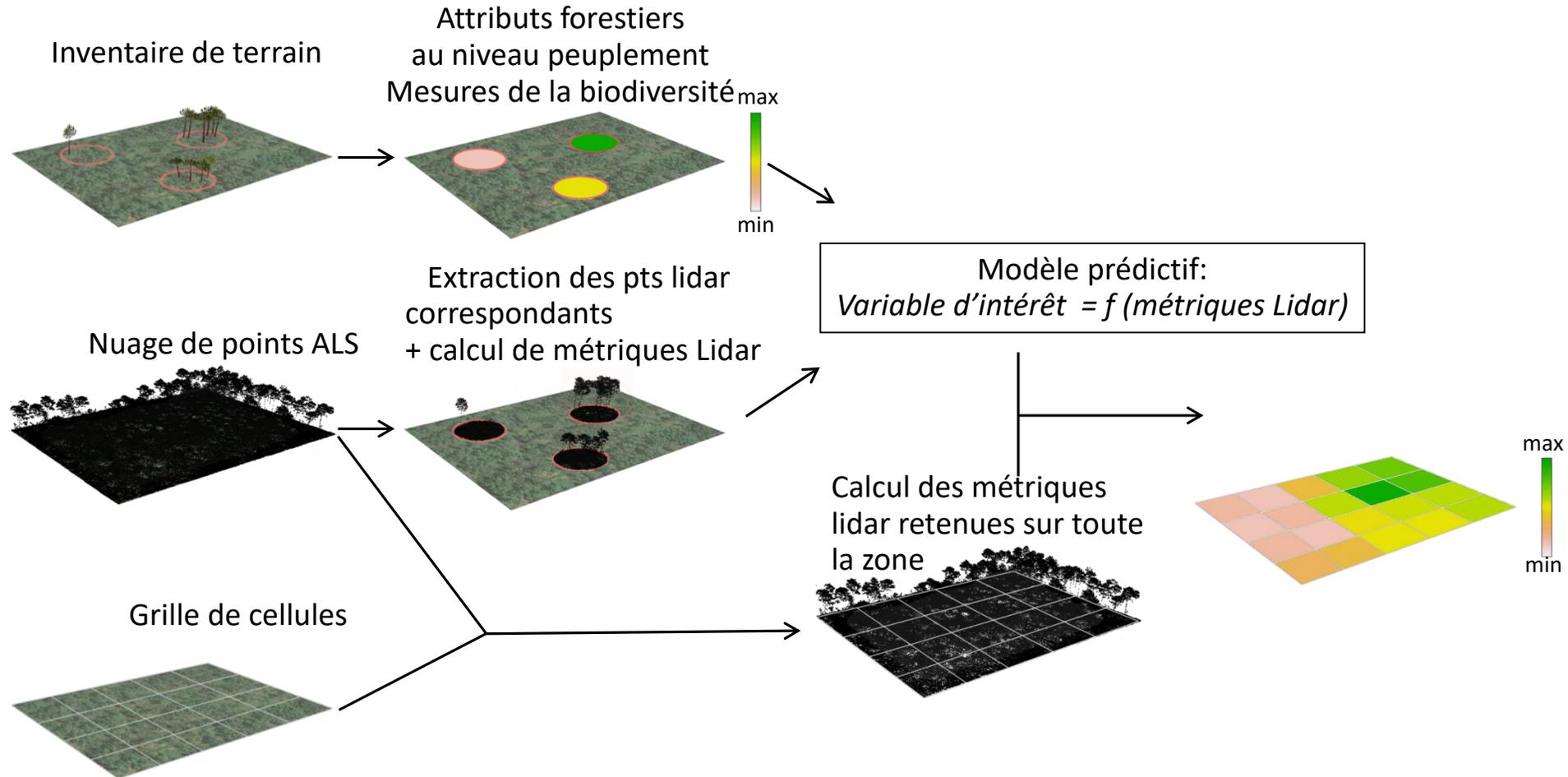
- Variables dérivées par modélisation



Crédit : adapté de M. Bouvier- Irstea

# La structure de la végétation par Lidar - Approches « surfaciques »

- Variables dérivées par modélisation & cartographie



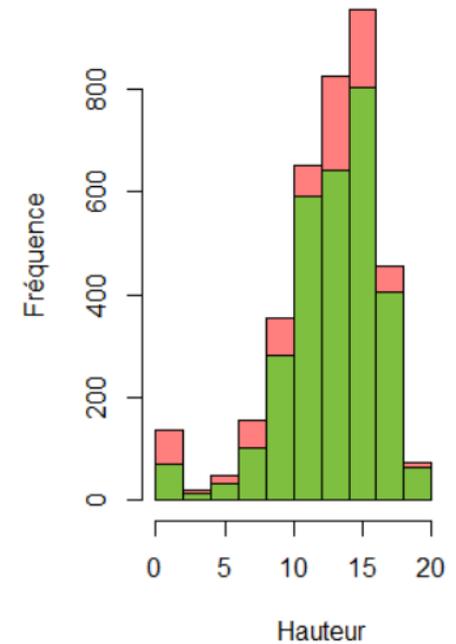
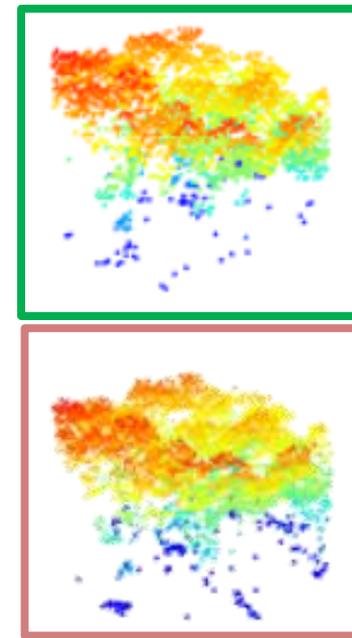
Crédit : adapté de M. Bouvier- Irstea

# Plan de la présentation

1. Principe de fonctionnement du Lidar topographique
2. Caractéristiques des données acquises
3. Produits dérivés des nuages de points 3D et leur intérêt pour l'étude des milieux terrestres
4. Limites et perspectives

# Limites et perspectives

- Coût des données
  - ▶ Programme national Lidar HD = opportunité pour l'appropriation des données Lidar par différentes communautés
  - ▶ Et ensuite ??? => pas suivi dans le temps
- Volume des données
  - ▶ Moyens de stockage et de calcul importants (ex Mtp: 300 Mo 1 km<sup>2</sup>)
  - ▶ Intérêt de développer des produits dérivés sur mesure pour la biodiversité
- La variabilité spatiale des conditions d'observation
  - ▶ Géométrie
    - ≡ Densité de points (système et plan de vol)
    - ≡ Angles de scan
  - ▶ Temporalité : sur de grandes surfaces : dates voire la saison (e.g. lidar HD) varient
- Utilisation de l'information radiométrique complexe
  - ≡ Pas accès à la calibration radiométrique des capteurs



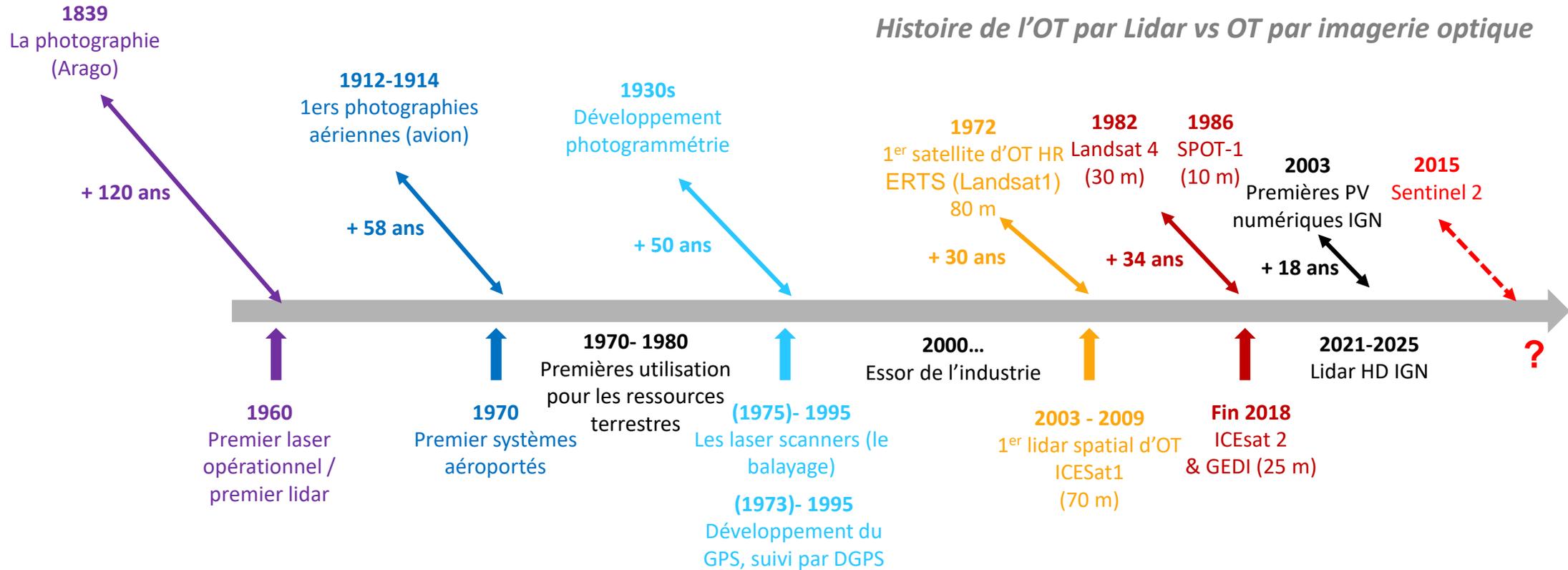
- Robustesse des métriques et des modèles
- Comparaisons diachroniques (dynamique des milieux)



- Identification de métriques robustes
- Normalisation données (e.g. LAD – Dayal et al. (2022))

# Limites et perspectives : une histoire récente

Histoire de l'OT par Lidar vs OT par imagerie optique



- Du chemin à faire pour standardiser les données et produits
- Début des applications opérationnelles niveau national (Lidar HD)
- Lidars spatiaux = prototypes
  - ▶ Couvertures non-continues
  - ▶ Développement de méthodes spécifiques

Sources :

- de Joinville, O., et al. (*Bulletin d'Information de l'IGN n. 74(3)*, 37 -2003)
- Nelson, R. (*Canadian Journal of Remote Sensing* 2013).
- R. Chevalier (Armand Collin-U2, 1971)
- Durrieu S. et Nelson R. (Space Policy, 2013)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Photographie\\_aérienne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Photographie_aérienne)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_camera](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_camera)
- <https://www.bluefalconaerial.com/the-history-of-lidar-advancements-applications-and-future-possibilities/>
- [http://www.geomag.fr/sites/default/files/28\\_37.pdf](http://www.geomag.fr/sites/default/files/28_37.pdf)
- [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)
- <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme\\_Landsat](https://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Landsat)
- <https://spot.cnes.fr/fr>

# Limites et perspectives: au-delà de la technologie

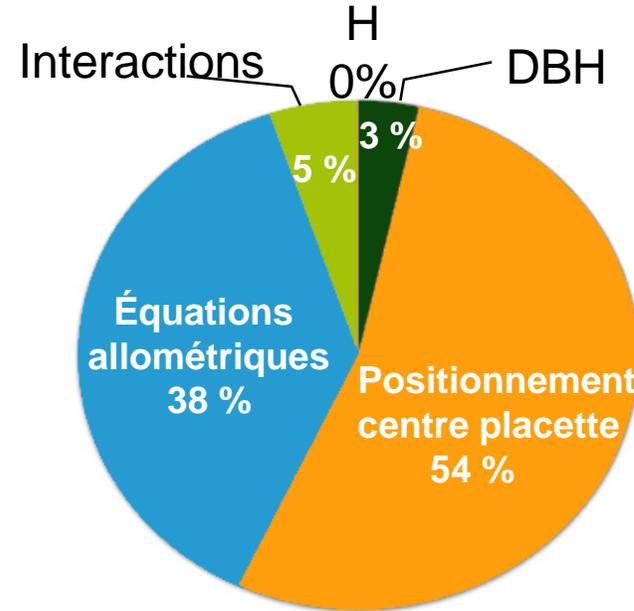
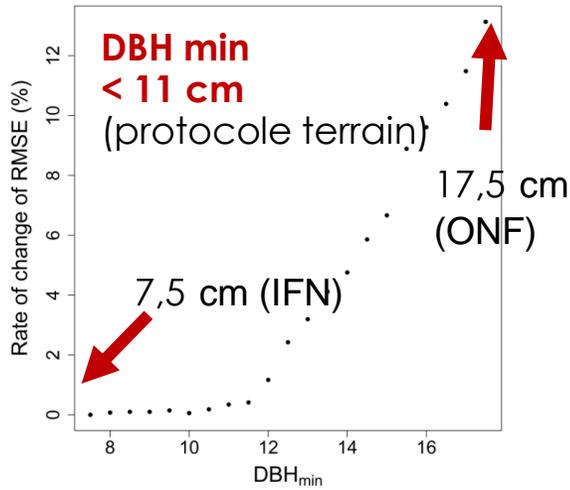
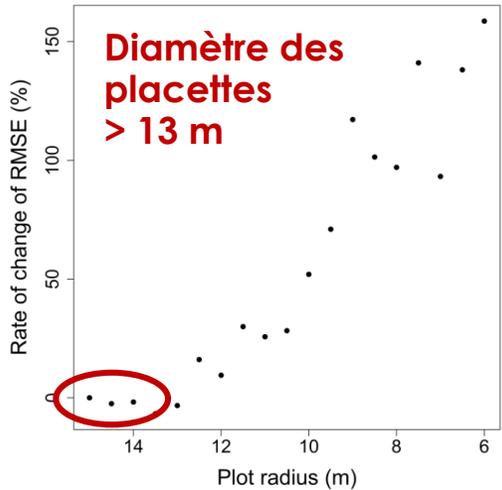
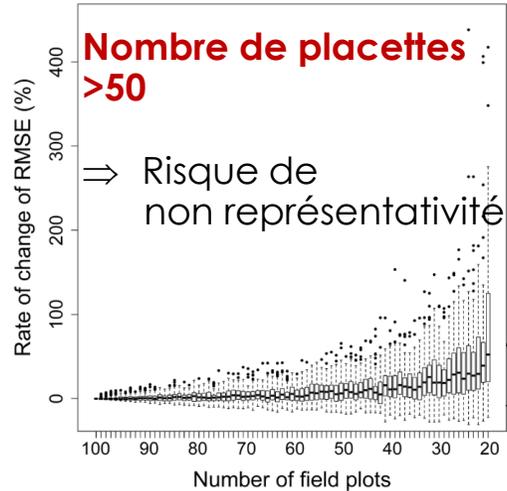
Pour que la technologie réponde aux objectifs pour laquelle elle est conçue et mobilisée il faut aussi :

- Un effort important pour acquérir des données de référence terrain adaptées
- Prendre en compte le coût environnemental des mesures et de leur analyse dans les choix des données et méthodes d'analyse

Illustration par 2 exemples

# Limites et perspectives: au-delà de la technologie

- Impact de la qualité des mesures de terrain sur des modèles d'estimation de la biomasse (Landes)
- Analyses de sensibilité individuelles et globales



*Part de variance en sortie de modèle expliquée par les incertitudes des différentes sources*

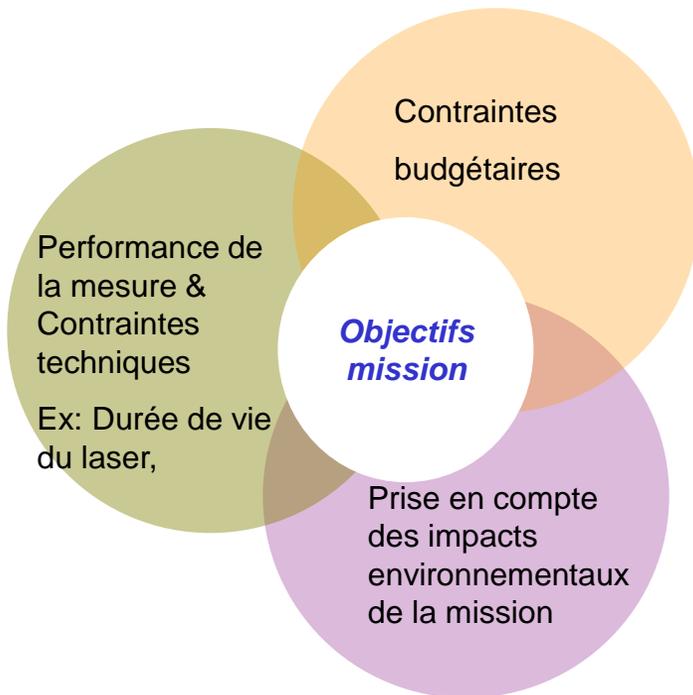
*(scenario DBHmin = 7,5 cm; Ø Placette = 15 m)*

**Importance de la qualité des données de référence terrain !**

**➔ Adapter les pratiques**

# Limites et perspectives: au-delà de la technologie

- **Hypothèse** : Diminuer les impacts environnementaux de la **phase d'acquisition** et **d'analyse des données** renforce la capacité des mesures à atteindre l'objectif visé, i.e. la gestion durable des ressources et suivi de la biodiversité
- **Objectif** : Assurer la durabilité des systèmes d'observation



- Activité spatiale source de pollutions
    - ▶ Débris spatiaux
    - ▶ Seule source de polluants directement émis dans la stratosphère moyenne et supérieure : H<sub>2</sub>O => forte ↘O<sub>3</sub>
    - ▶ Activité industrielle source de pollution terrestre
- ↓**
- ACV projet de mission LEAF - aéroporté vs spatial
    - ▶ Unité fonctionnelle : « Acquérir des données de télédétection de même qualité pour une surface équivalente à la surface forestière mondiale »
    - ▶ Echantillonnage
      - ≲ LEAF mesures contiguës : **10** indicateurs / 14 **en faveur de l'aéroporté**
      - ≲ LEAF mesures espacées de 500 m: **11** indicateurs /14 **en faveur du spatial**
      - ≲ Impacts O<sub>3</sub> sous estimés

Merci pour votre attention !

Vers un peu plus de sobriété ?



# Lidar spatiaux – GEDI : 1<sup>er</sup> Lidar spatial pour le suivi de la végétation

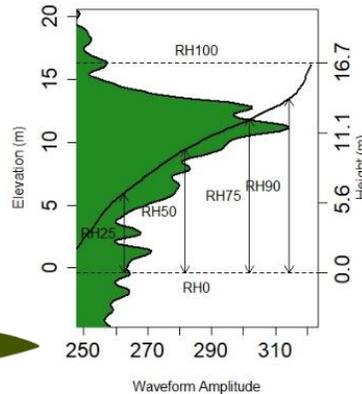
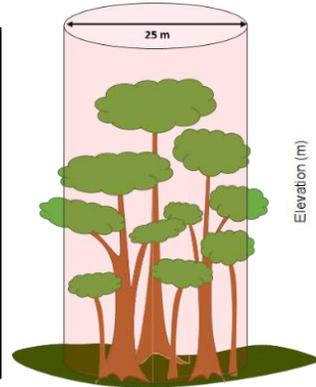
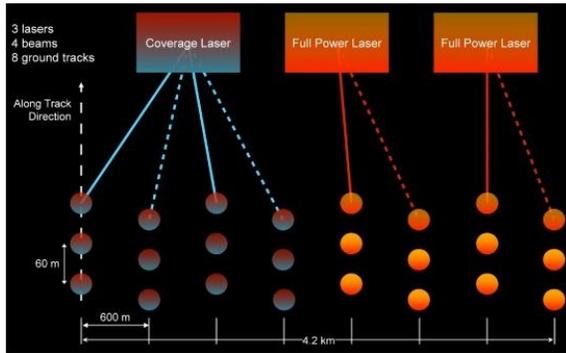


**Lancé le 05/12/2018**

- 1<sup>er</sup> Objectif: végétation & terrain
- Cycle C et H2O ; biodiversité habitats

## Spécifications instrumentales

- 3 lasers à 1064 - 10 mJ
- Taille d'empreinte ~25 m ; Fréquence d'émission 242 Hz



## Produits

- Formes d'onde géoréférencées (1B)
- Élévation terrain & Hauteur de végétation
- Structure verticale (profils RH & LAD)
- Taux de couvert
- Biomasse (4A)

Sources: et <https://gedi.umd.edu/> ; <https://directory.eoportal.org>

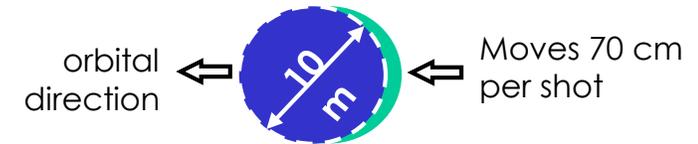
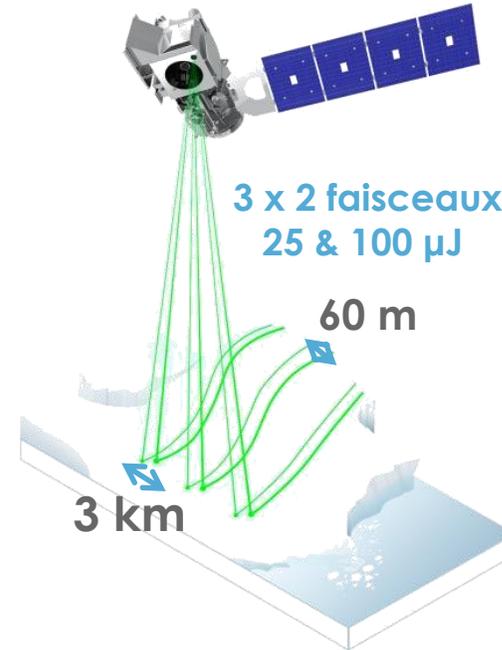


**Lancé le 15/09/2018**

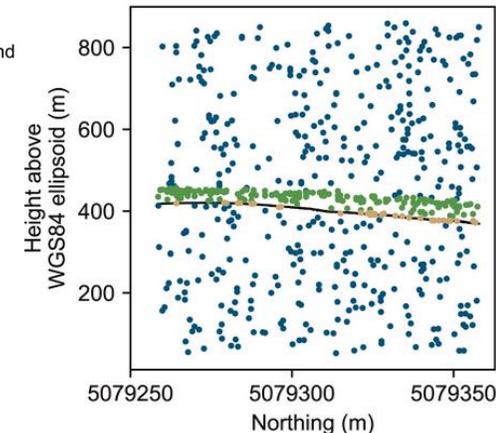
- 1<sup>er</sup> Objectif : Suivi de la calotte glaciaire
- Végétation : objectif secondaire

## Spécifications instrumentales

- Comptage de photon
- Vert (532 nm)
- Taille d'empreinte ~ 10 m
- Fréquence d'émission 10 kHz



- ATL08 ground
- ALS ground
- Noise
- Canopy
- Ground



## Produits

- Segments de 100 & 20 m
- Élévation du sol & H végétation

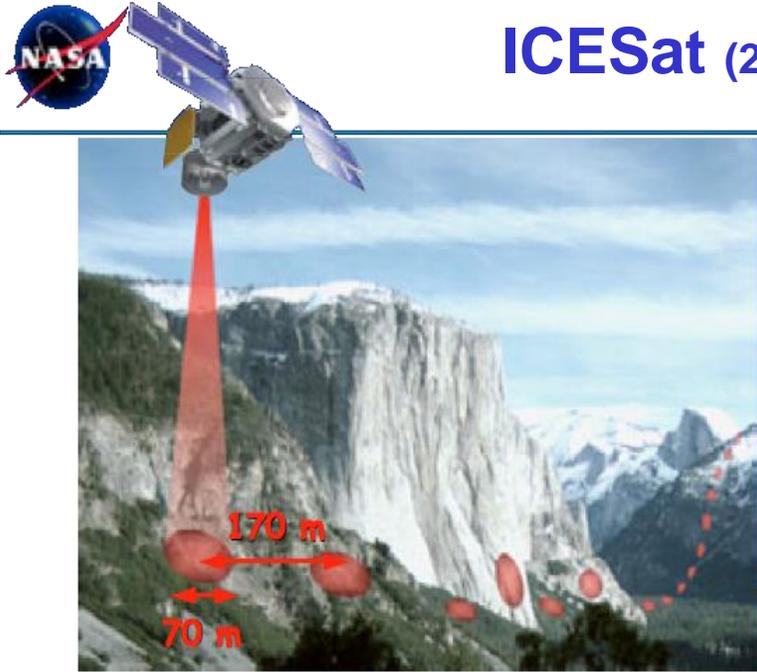
## Echantillons de mesures

- Pas de coïncidence spatiale entre données terrain & mesures Lidar
- Développement de méthodes spécifiques (e.g. IFM, fusion données)

Sources: <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/>  
Purslow et al. (Sc. of RS, 2023)

# Lidar spatiaux – ICESat

ICESat (2003-2009)



## Spécifications instrumentales

- **Système profileur ; 2 longueurs d'onde**
  - 1064 nm - 75 mJ : surface (glace, topo, végétation)
  - 532 nm - 35 mJ : atmosphère (nuages, aérosols)
- Large empreinte ~70 m
- Fréquence d'émission 40 Hz
- Précision de positionnement : 10 m (+ en pratique)

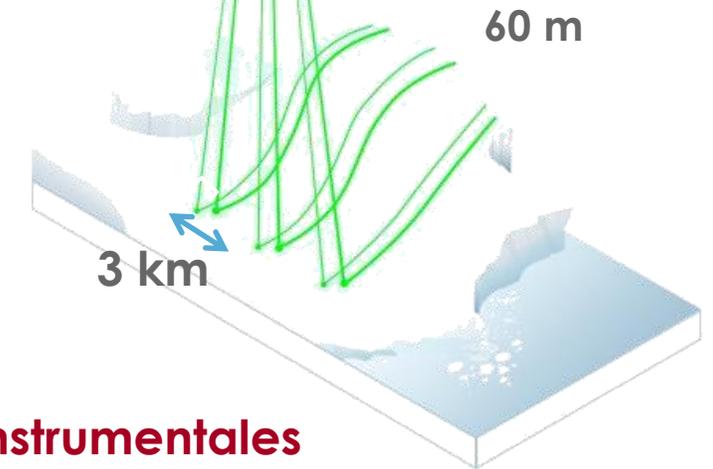
ICESat-2  
ICE, CLOUD, AND LAND ELEVATION SATELLITE-2



Lancé le 15/09/2018

- 1<sup>er</sup> Objectif = Suivi de la calotte glaciaire
- Végétation = objectif secondaire

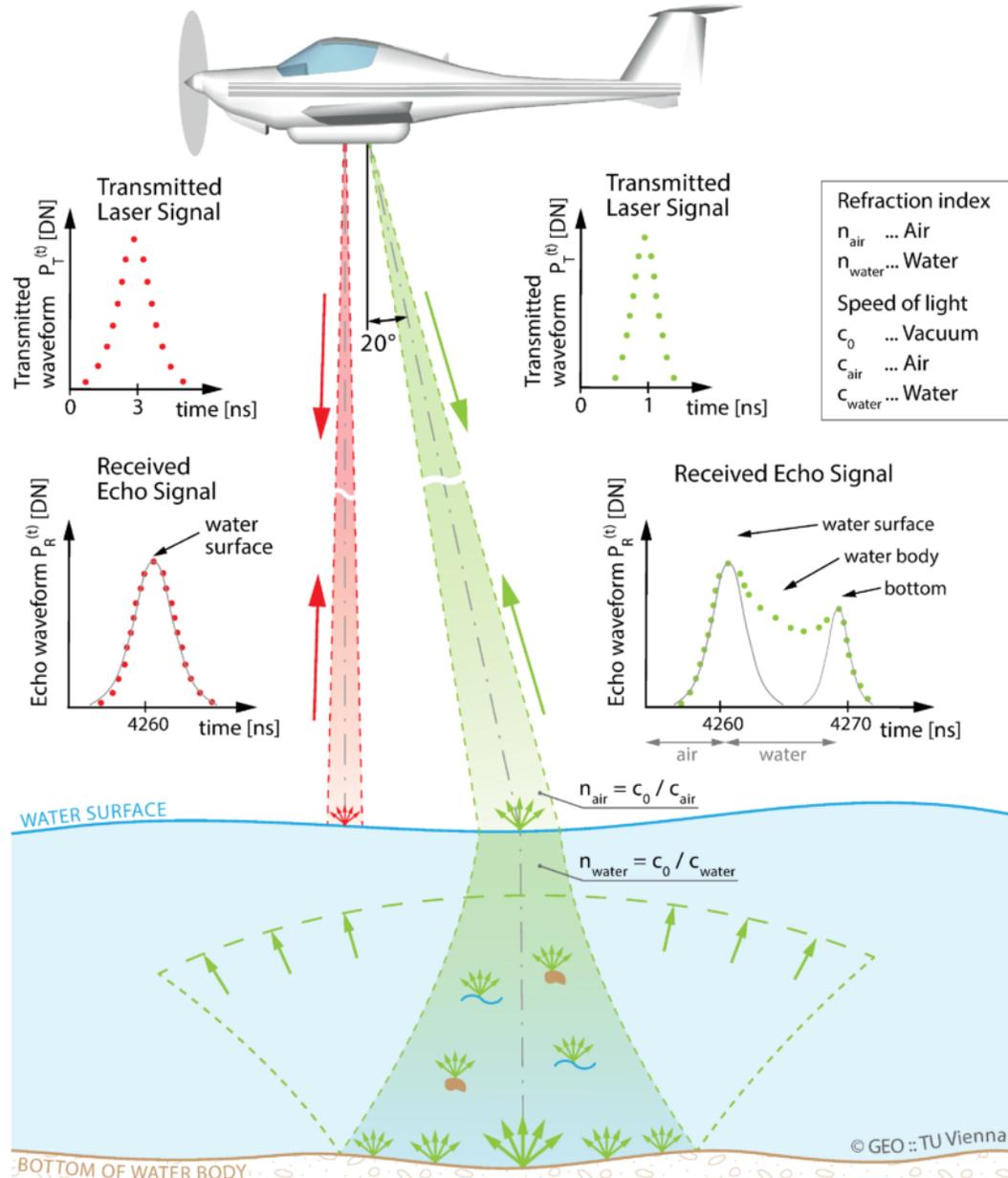
3 x 2 faisceaux  
25 & 100  $\mu$ J



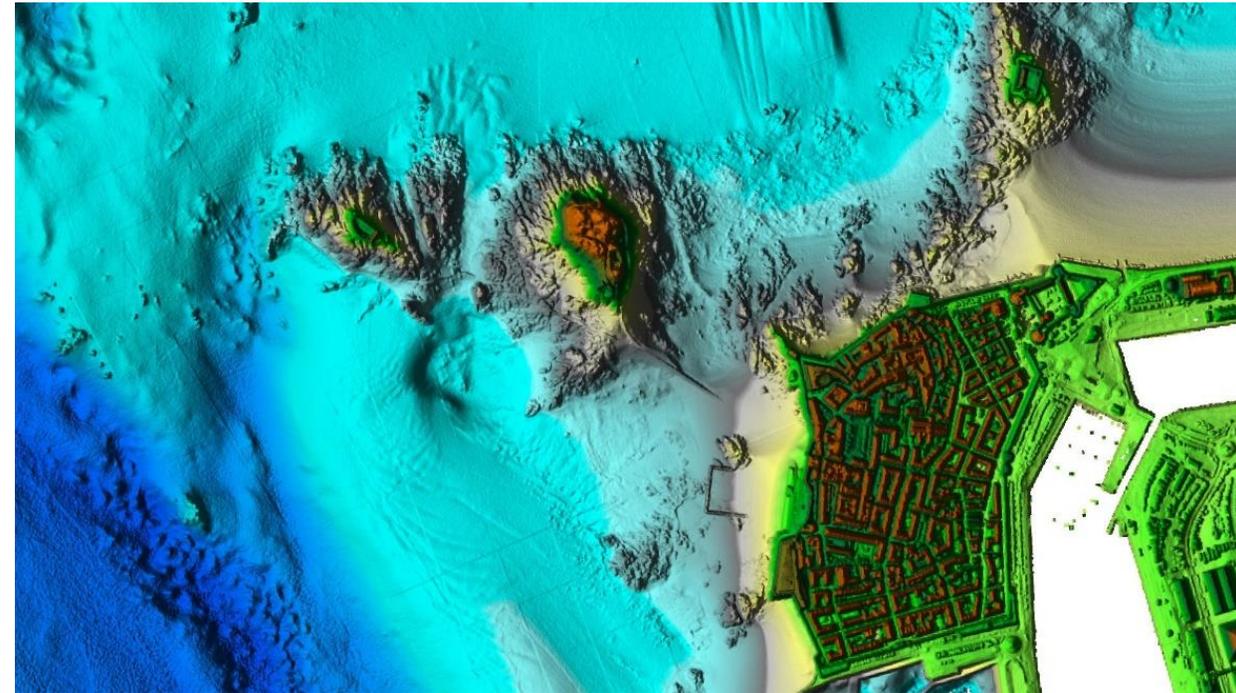
## Spécifications instrumentales

- **Comptage de photon**
- **Vert (532 nm)**
- Taille d'empreinte moyenne de 10 m
- taux de répétition de l'émission 10 kHz (70 cm au sol) => améliore l'estimation de la pente
- Précision de pointage de 6 m ( $1\sigma$ )

# Caractérisation des milieux aquatiques



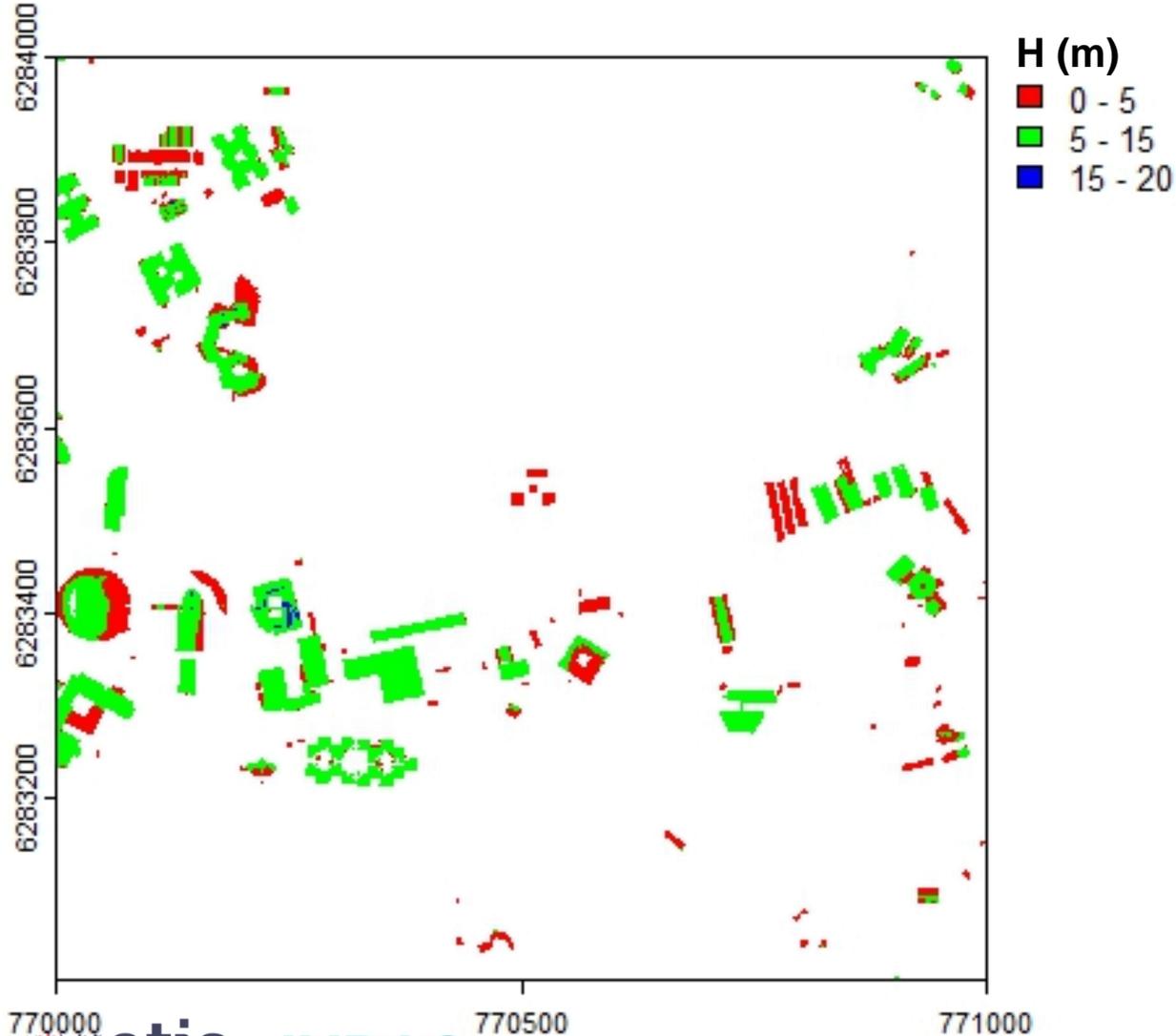
- Lidar bathymétrique ou topo-bathymétrique
- Ex: Litto 3D<sup>®</sup> (SHOM – IGN)



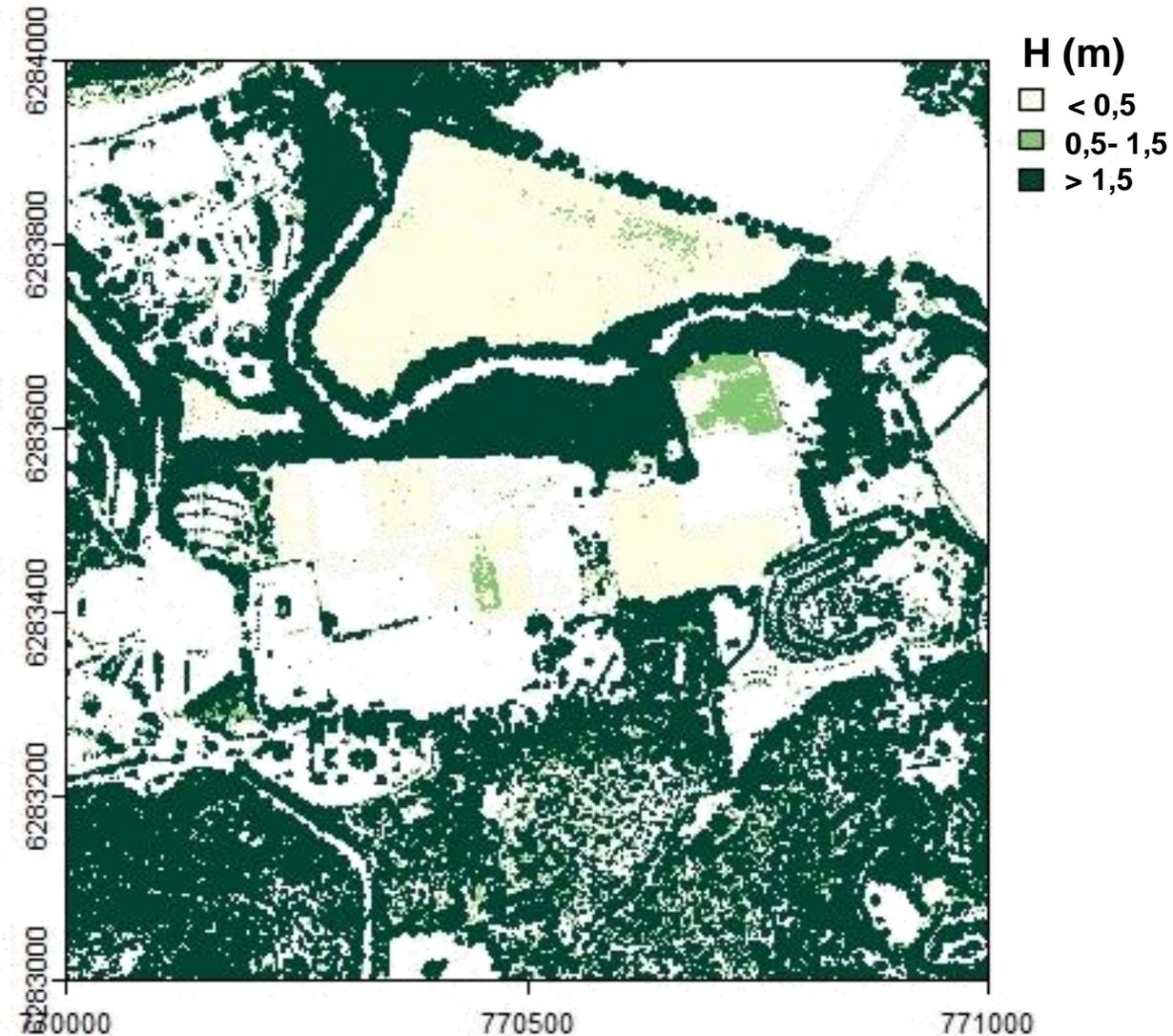
<https://diffusion.shom.fr/donnees/altimetrie-littorale/litto-3d.html>

# Produits dérivés spécifiques: exemple de cartes végétation ou bâti

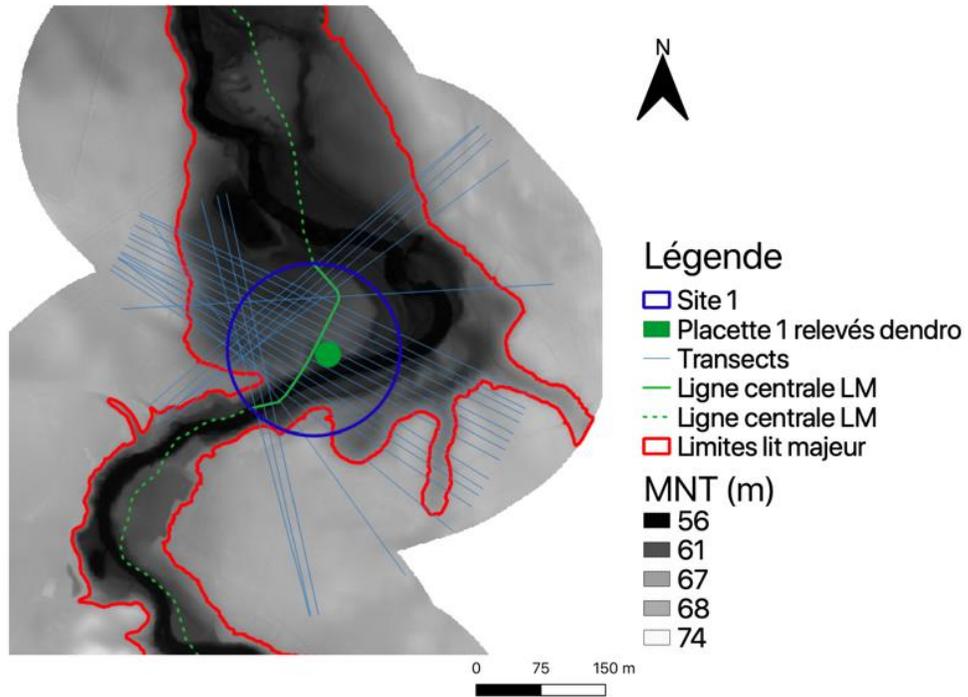
Carte des bâtiments par classe de hauteur (res=1m)



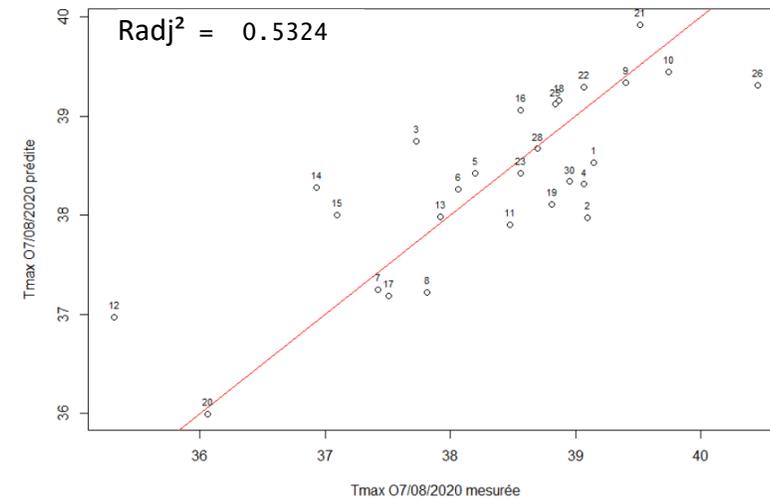
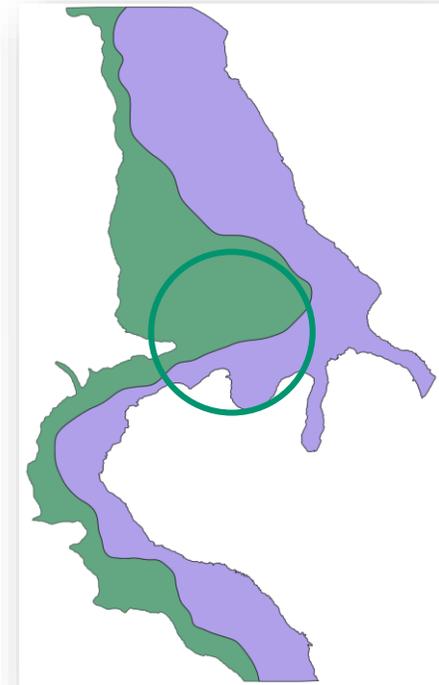
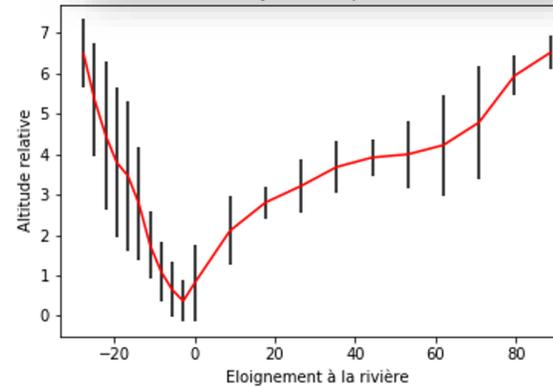
Carte des types de végétation (res=1m)



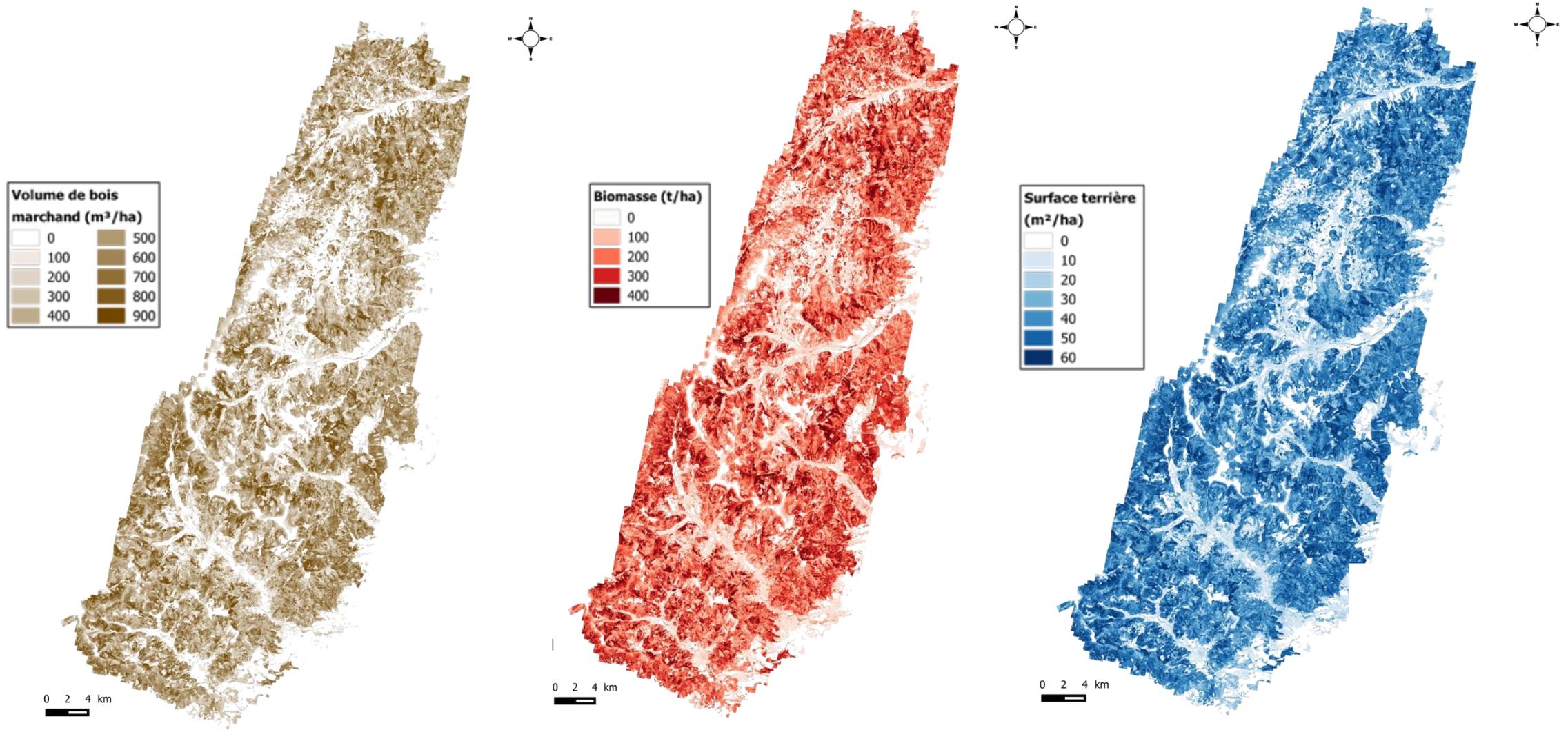
# Intérêt des MNT issus du Lidar- exemple sur une ripisylve



Profil moyen de la placette 11



# Cartographie des attributs forestiers – Exemple : massif des Vosges



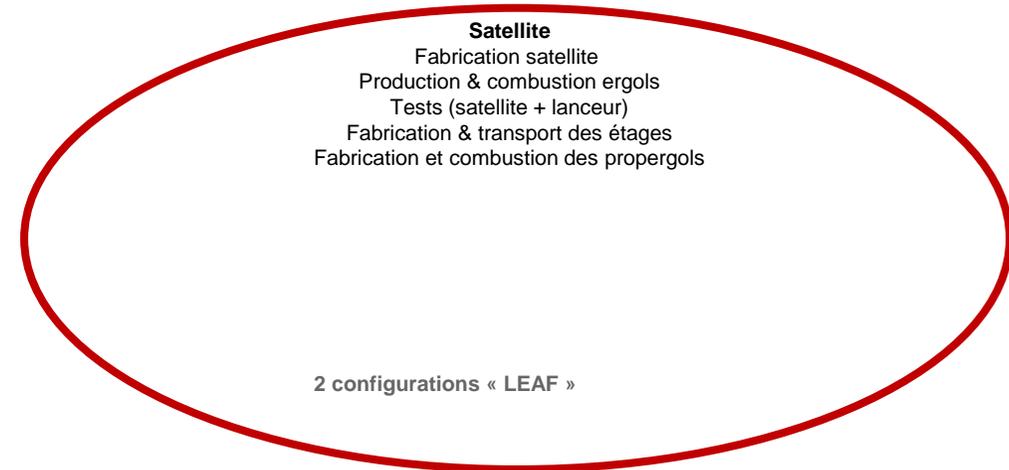
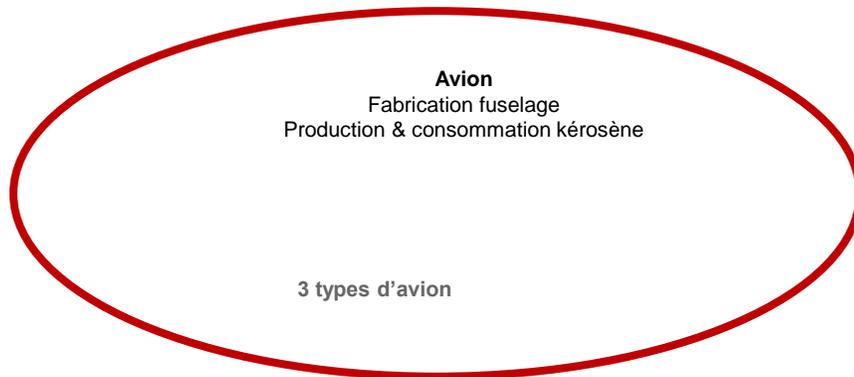
[Bouvier, 2015]

# ACV comparative spatial/aéroporté

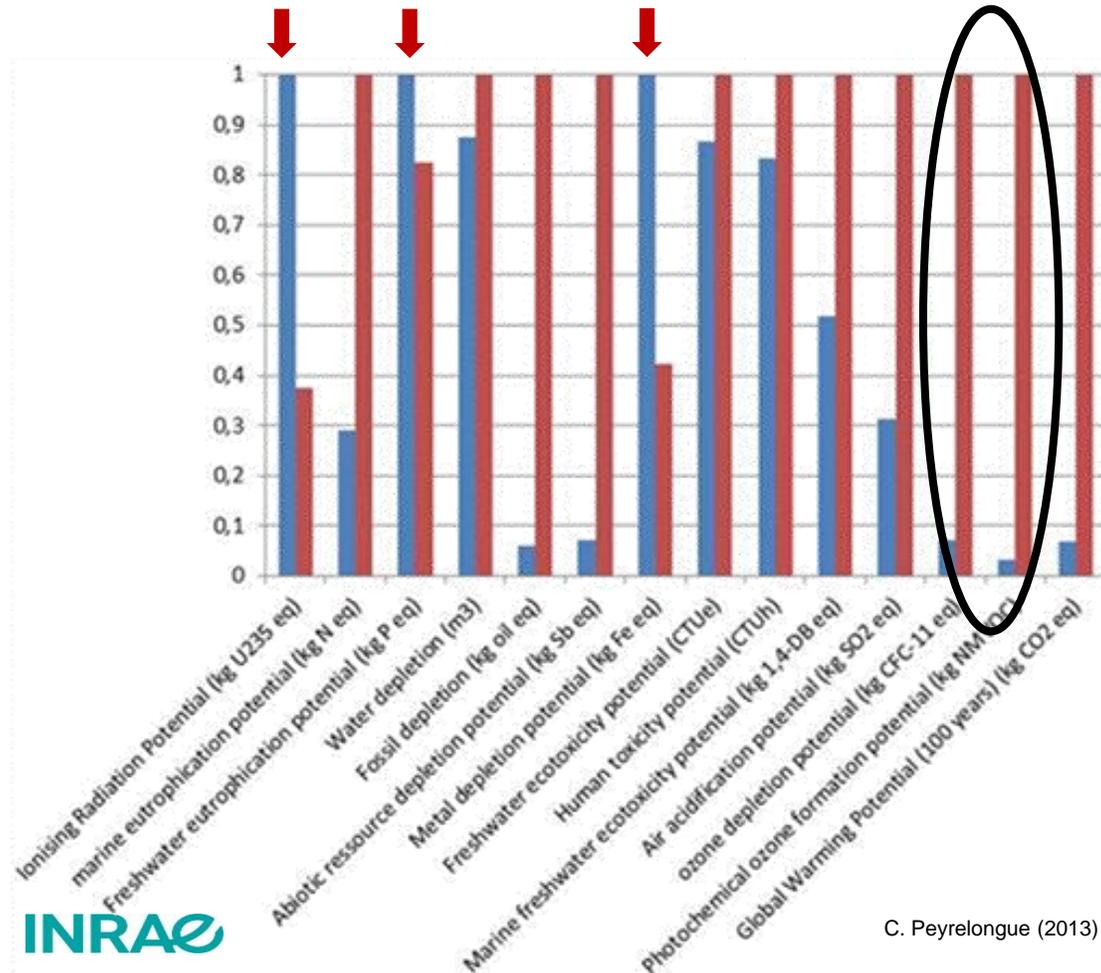
Stage C. Peyrelongue

Comparaison du coût environnemental lié à l'acquisition des données aéroportées et spatiales

- Unité fonctionnelle : « Acquérir des données de télédétection de même qualité pour une surface équivalente à la surface forestière mondiale »
- Périmètre de l'étude



# ACV comparative spatial/aéroporté

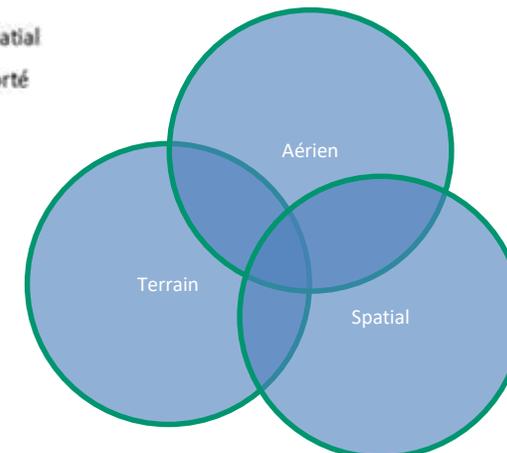


LEAF mesures contiguës

- ▶ 10 indicateurs / 14 en faveur de l'aéroporté

LEAF mesures espacées de 500 m

- ▶ 11 indicateurs / 14 en faveur du spatial
- ▶ Impacts O<sub>3</sub> sous estimés



C. Peyrelongue (2013)

# Caractérisation de la structure de la végétation

## Quelques Variables de Structure

- **Densité de végétation**
  - Taux de couvert
  - Nombre de tiges
  - Surface terrière
  - Répartition des forêts
- **Caractéristiques de hauteur**
  - Hauteur max/moy/dominante
  - Distribution des hauteurs
- Les trouées et leur dynamique
- LAI/ profils densité foliaires

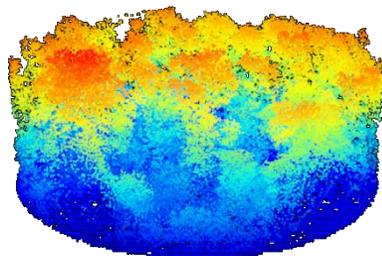


Permettent d'estimer d'autres variables  
(e.g. biomasse)



Source : <http://www.lfi.ch/>

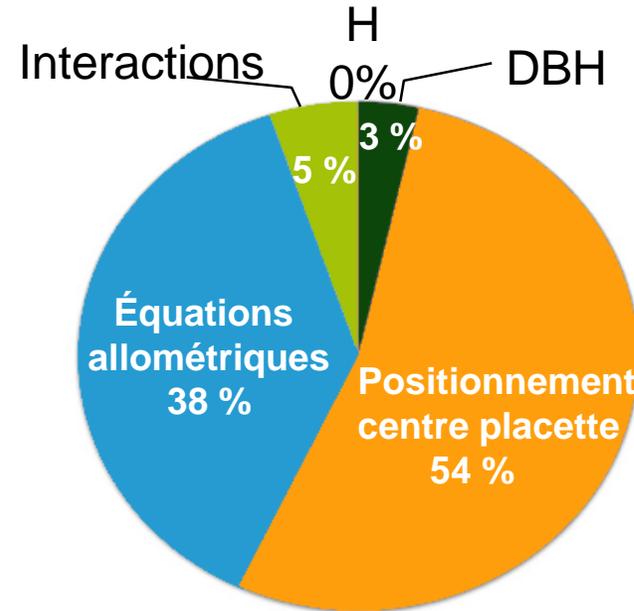
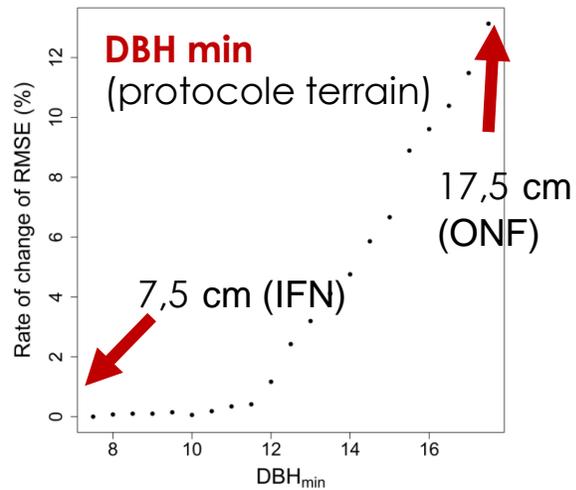
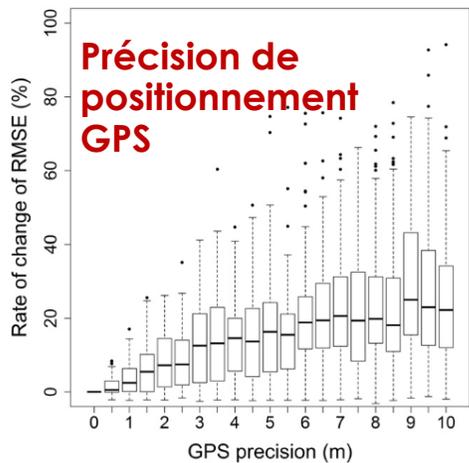
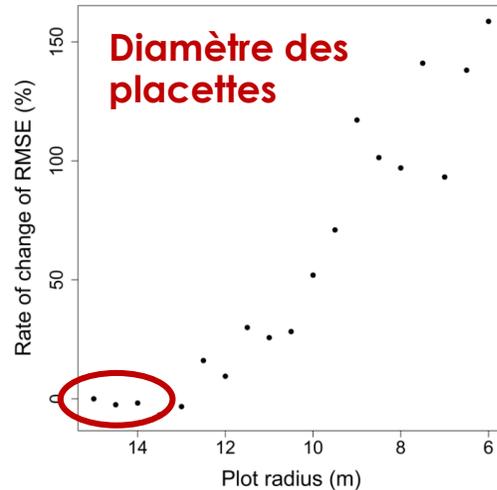
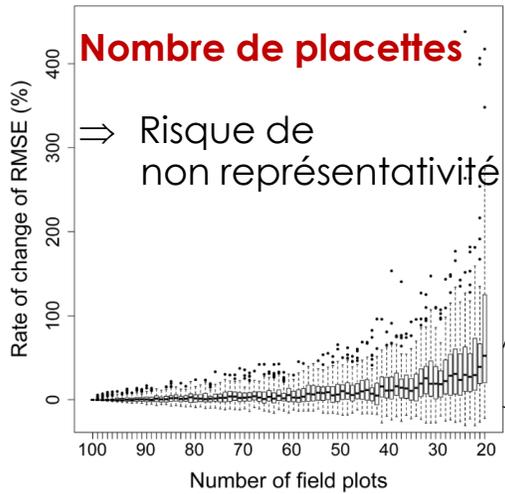
- Relevés terrain sont limités par
  - ▶ Coût élevé par unité de surface
  - ▶ Accessibilité (topographie, propriété)
  - ▶ La difficulté de certaines mesures
    - ≡ Positionnement des troncs
    - ≡ Mesure des hauteurs et de l'étendue des couronnes
    - ≡ Biais subjectifs liés à l'observateur



- Le lidar: meilleure technique de télédétection pour mesurer la structure en 3D de la végétation

# Limites et perspectives: au-delà de la technologie

- Impact de la qualité des mesures de terrain sur des modèles d'estimation de la biomasse
- Analyses de sensibilité (individuelles et globales)



*Part de variance en sortie de modèle expliquée par les incertitudes des différentes sources*

*(scenario DBH<sub>min</sub> = 7,5 cm; Ø Placette = 15 m)*

**Importance de la qualité des données de référence terrain !**

**→ Adapter les pratiques**