

# Impact de la qualité du modèle numérique de surface pour la correction géométrique d'images hyperspectrales à très haute résolution spatiale

H. Tardy, Y. Boucher, S. Doz, N. Sikora

ONERA - DOTA - POS

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques
- Permettre la combinaison de données de sources différentes



Feuille  
étiquetée



Drone

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques
- Permettre la combinaison de données de sources différentes



Feuille  
étiquetée



Drone

## Difficulté :

Le géoréférencement au centimètre est un challenge

[2] D. Turner (2017) : RMSE 5cm / 2,5px sur sol plat

## Problématique :

sursol : Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques est-il possible ?

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

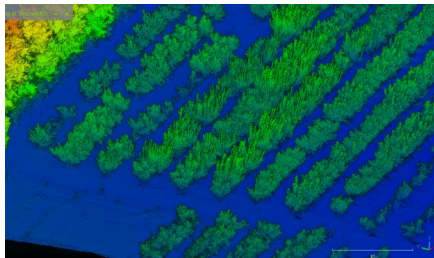
## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques



Instrument pushbroom : nécessite un Modèle Numérique de Surface (MNS)

**Objectif:** comparer la qualité de MNS provenant de 5 sources différentes (LiDAR aéroporté, photogrammétrie, cibles GNSS et IGN photogrammétrie et LiDAR) pour l'orthorectification d'images hyperspectrales pushbroom



Nuage de point LiDAR

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

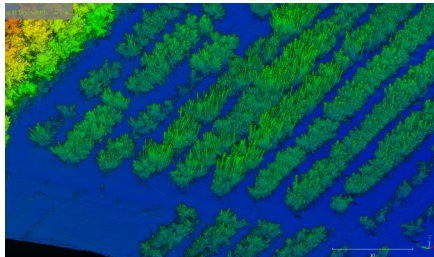
## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques



Instrument pushbroom : nécessite un Modèle Numérique de Surface (MNS)

**Objectif:** comparer la qualité de MNS provenant de 5 sources différentes (LiDAR aéroporté, photogrammétrie, cibles GNSS et IGN photogrammétrie et LiDAR) pour l'orthorectification d'images hyperspectrales pushbroom



Nuage de point LiDAR



Photogrammétrie

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

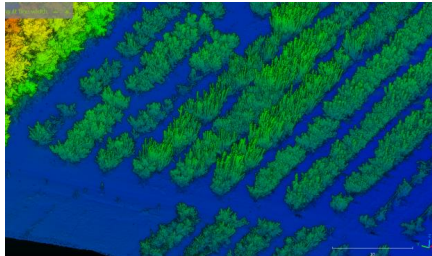
## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques



Instrument pushbroom : nécessite un Modèle Numérique de Surface (MNS)

**Objectif:** comparer la qualité de MNS provenant de 5 sources différentes (LiDAR aéroporté, photogrammétrie, cibles GNSS et IGN photogrammétrie et LiDAR) pour l'orthorectification d'images hyperspectrales pushbroom



Nuage de point LiDAR



Photogrammétrie



Acquisition canne  
RTK (GNSS) sur  
cible

# Contexte

L'imagerie par drone hyperspectrale pour l'arboriculture (projet CANOP: ANR-22-CE04-0002 [1]).

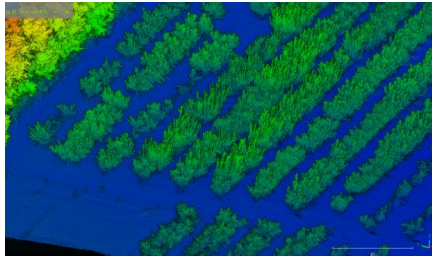
## Contexte technique :

- Cibler l'échelle feuille avec des résolutions spatiales centimétriques



Instrument pushbroom : nécessite un Modèle Numérique de Surface (MNS)

**Objectif:** comparer la qualité de MNS provenant de 5 sources différentes (LiDAR aéroporté, photogrammétrie, cibles GNSS et IGN photogrammétrie et LiDAR) pour l'orthorectification d'images hyperspectrales pushbroom



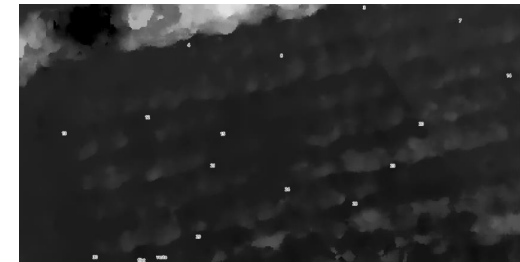
Nuage de point LiDAR



Photogrammétrie



Acquisition canne  
RTK (GNSS) sur  
cible



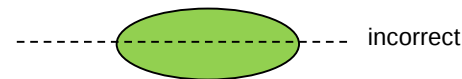
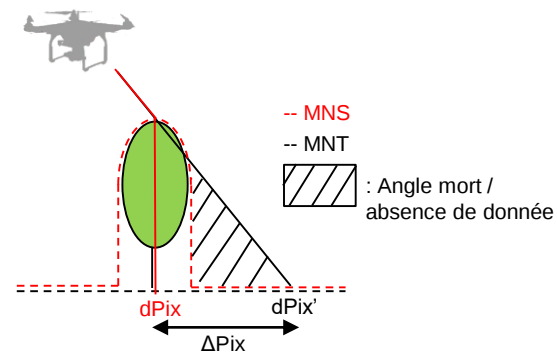
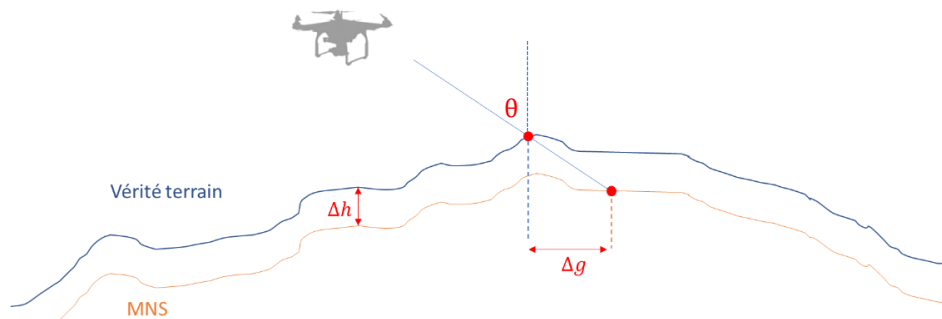
MNS IGN (20cm)

# Contexte : orthorectification

Erreur planimétrique induite par une erreur de hauteur

$$\Delta g = \Delta h * \cotan(\theta)$$

Avec  $\Delta g$  l'erreur au sol,  $\Delta h$  : erreur de hauteur,  $\theta$  : angle d'incidence



Déformation due à une erreur de MNS

# Contexte : orthorectification

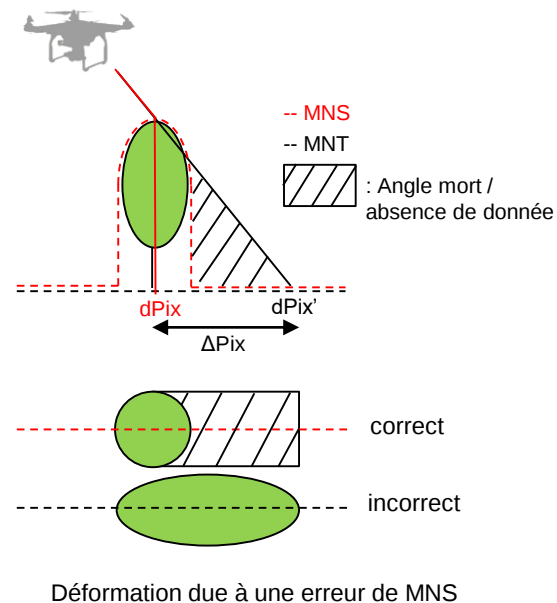
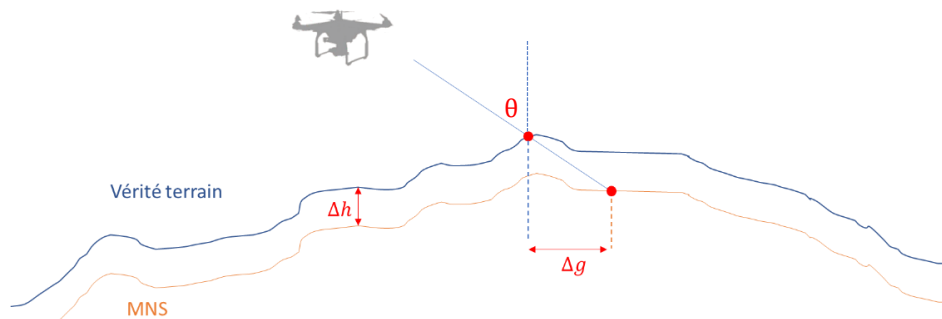
Erreur planimétrique induite par une erreur de hauteur

$$\Delta g = \Delta h * \cotan(\theta)$$

Avec  $\Delta g$  l'erreur au sol,  $\Delta h$  : erreur de hauteur,  $\theta$  : angle d'incidence

Quelques valeurs aux limites du champ de vision :

Pour  $\Delta h = 10\text{cm}$ ,  $\Delta g = 1,7\text{ cm}$  pour  $\theta = 10^\circ$  (mjolnir FOV  $20^\circ$  )



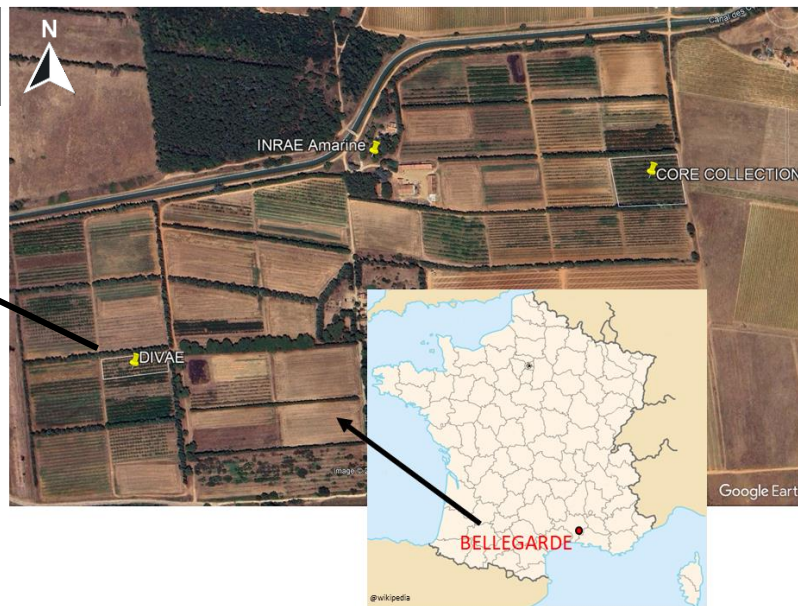
# Site d'étude

- Verger de dimensions 100m x 35m
- Acquisitions en septembre 2024
- Structures d'arbres très différentes



**Espèces**     **Abricotier/Pêcher**

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| <b>Nombre de variétés</b> | 7/5 répliquées en 5 blocs |
|---------------------------|---------------------------|



# Matériel

Instruments (vol à 50m):

1. **Caméra hyperspectrale pushbroom VS-640 MJOLNIR NEO**

- Respectivement 200 et 300 bandes VNIR (0.4nm – 1nm) et SWIR (1 – 2.5nm)
- Résolution spatiale au sol : VNIR **1,35cm** / SWIR **2,7cm**
- 8 lignes de vol
- Nacelle stabilisatrice GREMSY



VS-620 MJOLNIR



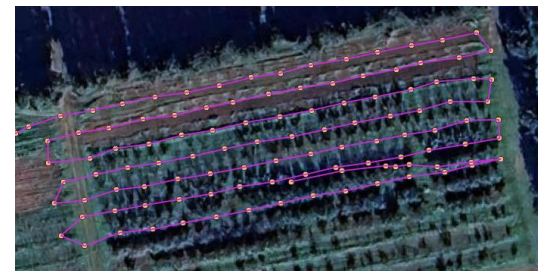
Lignes de vols hyperspectral

2. **Caméra Multispectrale MUSCA DELAIR :**

- Voies vertes/rouge/PIR respectivement **532nm/660nm/810nm**
- Résolution **0,8cm au sol**
- 7 lignes de vol, recouvrement 80%



MUSCA



Lignes de vol photogrammétrie

3. **LiDAR 3D RIEGL VUX 1 LR**

- densité de pts > 1000 pts/m<sup>2</sup>
- Lignes de vols : 1 rangée sur 2



VUX 1 LR

# Matériel

## Cibles sol :

- 22 cibles photogrammétriques mesurées par canne RTK (Antenne Emlid Reach RS2+)
- RMS moyen sur les cibles : 1,5-2 cm



## Mires radiométriques :

- 3 mires permaflect 50%, 5% et 80%



## Cibles canopée :

Etiquetage feuille sur une partie des pêchers et abricotiers

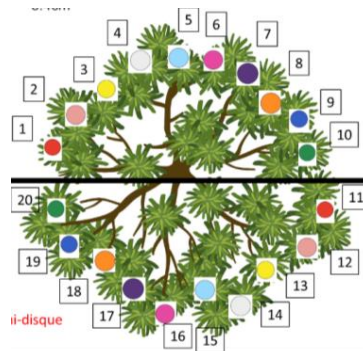


Schéma de répartition des étiquettes



Feuille étiquetée

# Génération MNS : méthode

## GNSS :

Interpolation linéaire

## Photogrammétrie :

Génération nuage de points

Recalage manuel

## LiDAR

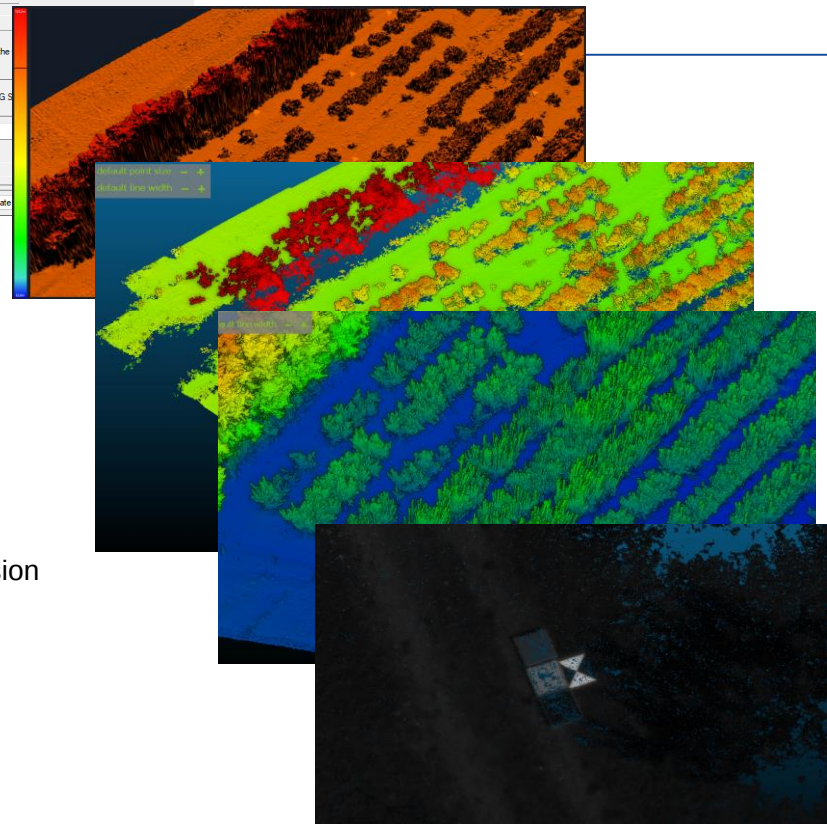
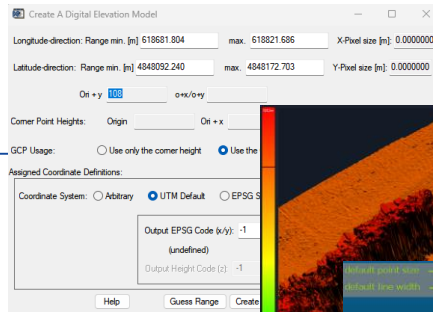
Recalage manuel

## IGN

- Photogrammétrie : MNS IGN à 20cm de résolution spatiale (été 2021), précision altimétrique moyenne : -6.5cm
- LiDAR HD : ~10 pts / m<sup>2</sup>

Pas de recalage manuel

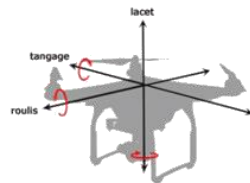
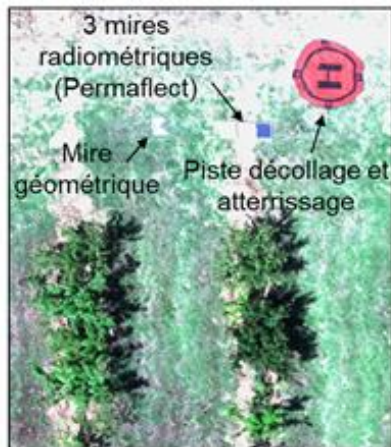
Logiciels utilisés : PARGE, Qintertia, Correlator3D, Cloudcompare



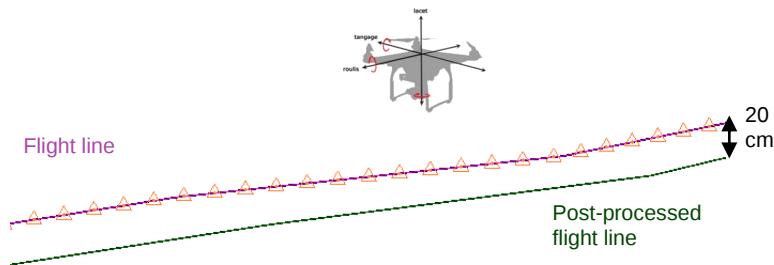
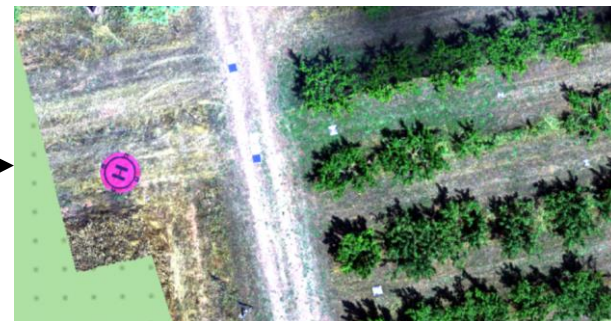
# Orthorectification : méthode

Processus d'orthorectification pushbroom:

- Recalage de la trajectoire
- Génération des attitudes (orientation + position) de vol
- Reprojection des pixels



Orientation + position X,Y,Z du capteur

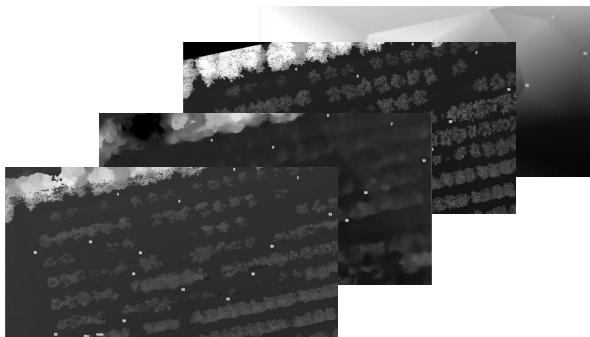


Logiciels utilisés : pospac UAV, Hyspex, PARGE

# Critères d'évaluation : méthode

Après génération des MNS :

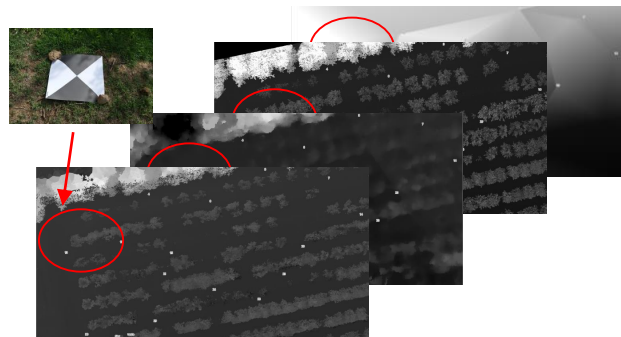
- Etude qualitative (visuel)



# Critères d'évaluation : méthode

Après génération des MNS :

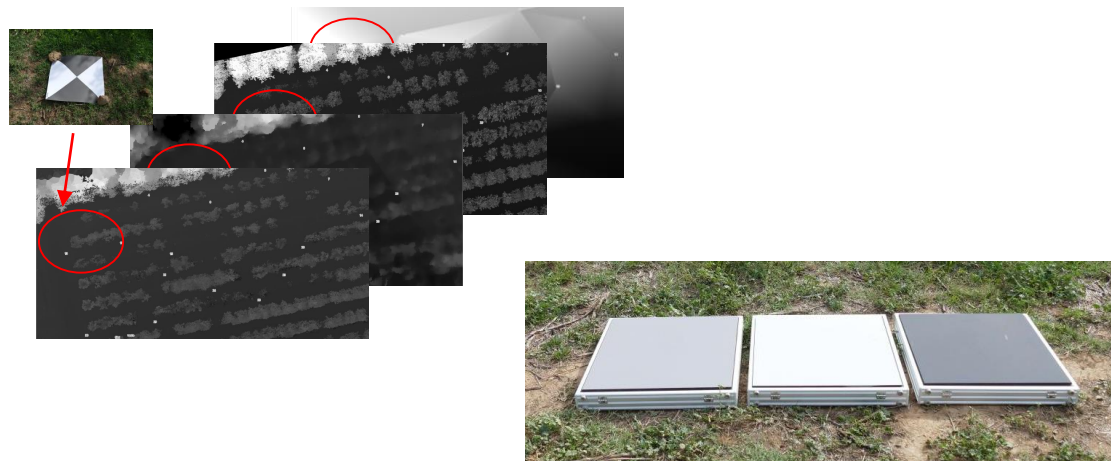
- Etude qualitative (visuel)
- RMSE Z



# Critères d'évaluation : méthode

Après génération des MNS :

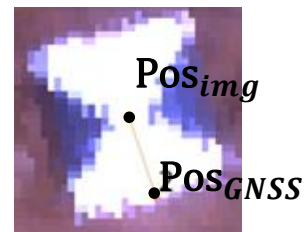
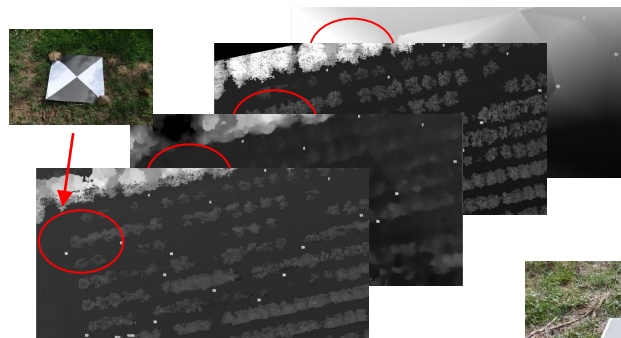
- Etude qualitative (visuel)
- RMSE Z
- Ecart / Variance en Z sur 3 mires permaflect



# Critères d'évaluation : méthode

Après génération des MNS :

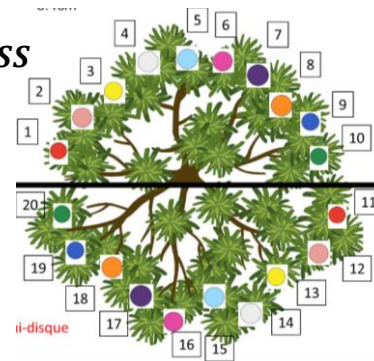
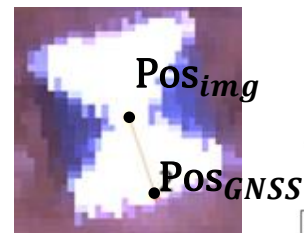
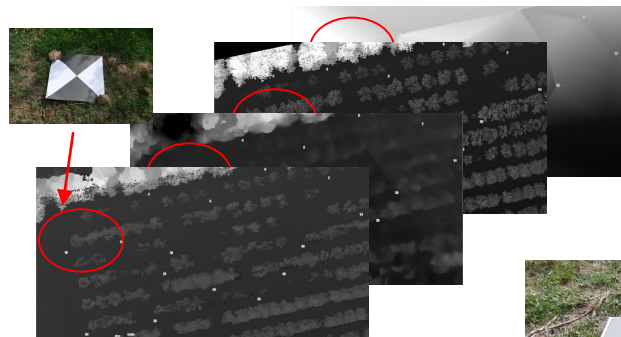
- Etude qualitative (visuel)
- RMSE Z
- Ecart / Variance en Z sur 3 mires permaflect
- RMSE XY



# Critères d'évaluation : méthode

Après génération des MNS :

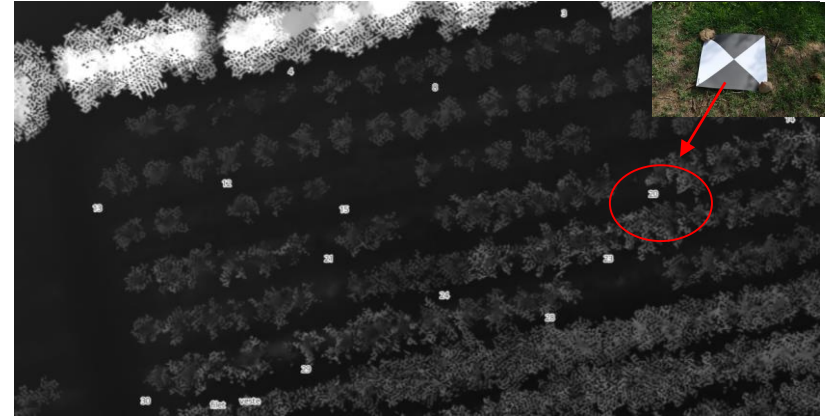
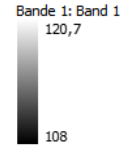
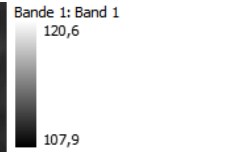
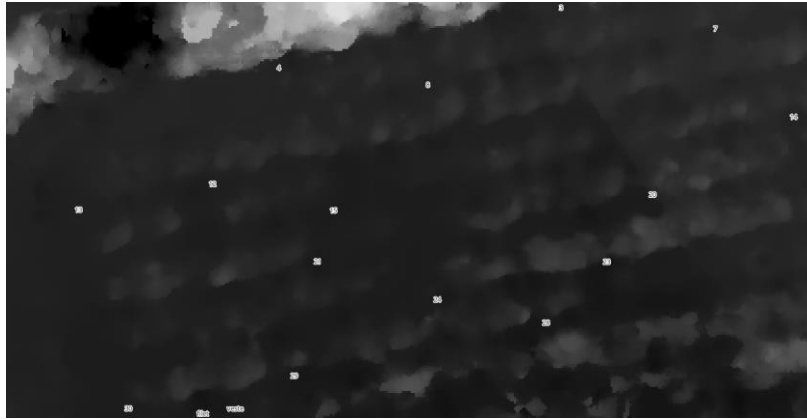
- Etude qualitative (visuel)
- RMSE Z
- Ecart / Variance en Z sur 3 mires permaflect
- RMSE XY
- Ecart XY relatif sur cibles canopée



MNS IGN (20cm)

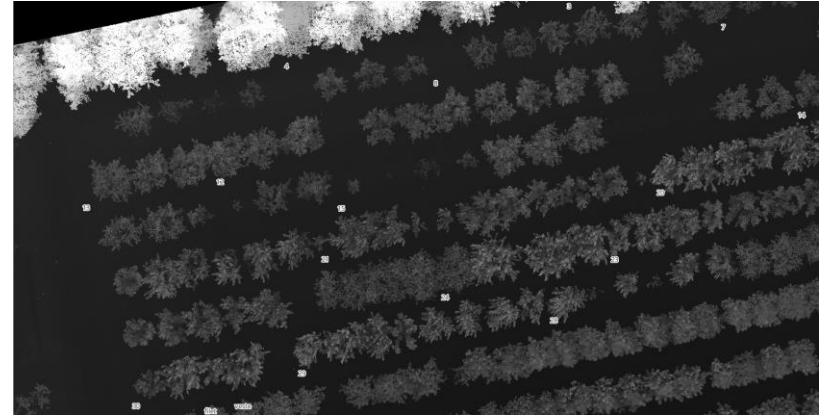
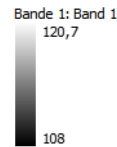
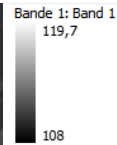
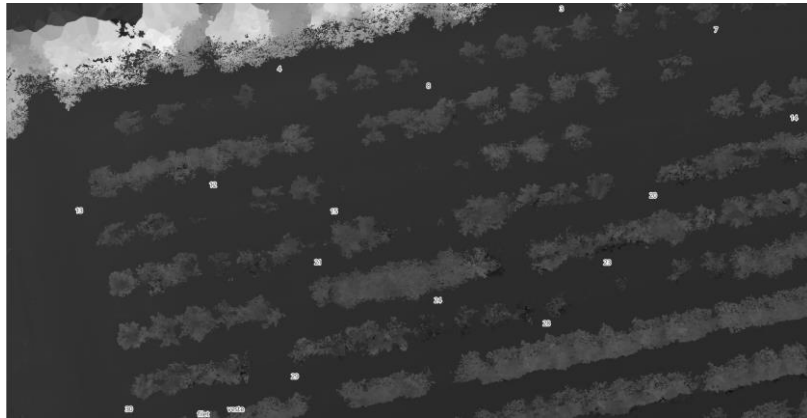
Vue d'ensemble

IGN LiDAR HD

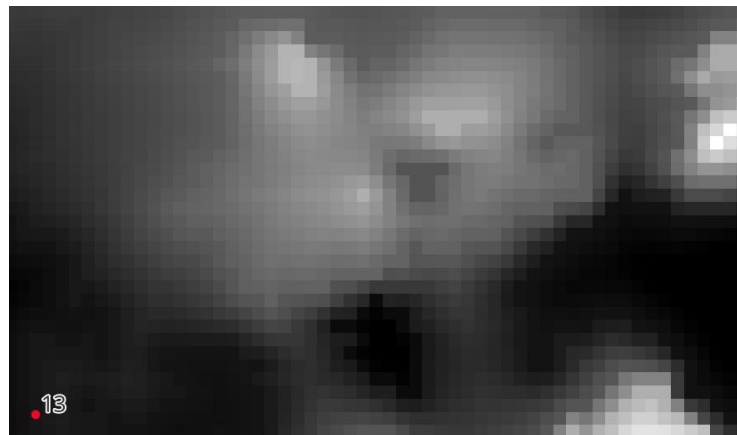


photogrammetrie

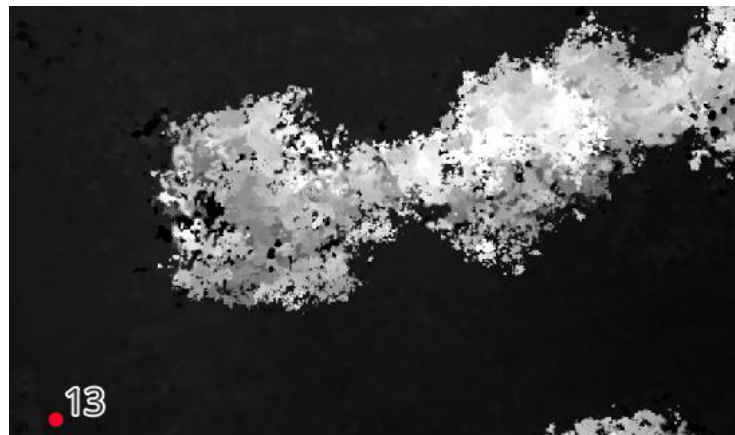
LiDAR



MNS IGN (20cm)



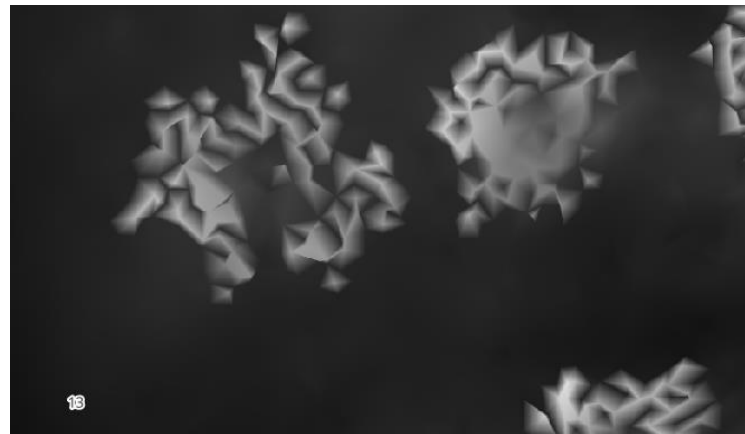
photogrammetrie



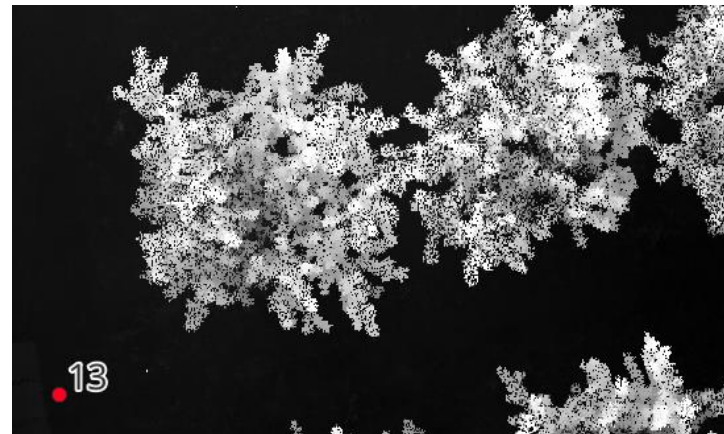
Zoom



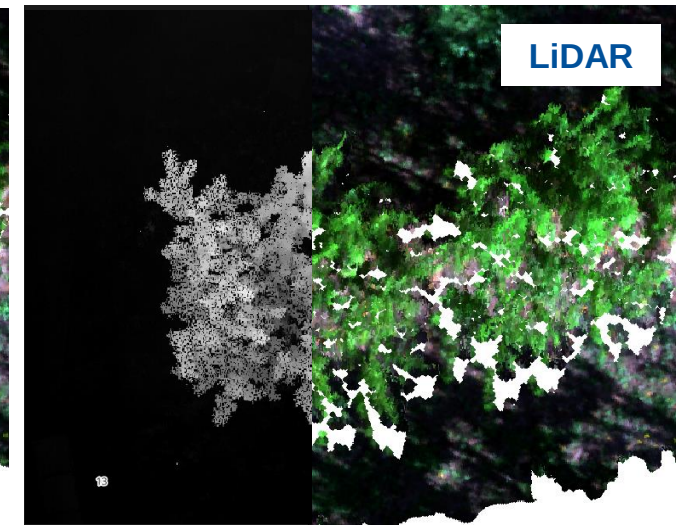
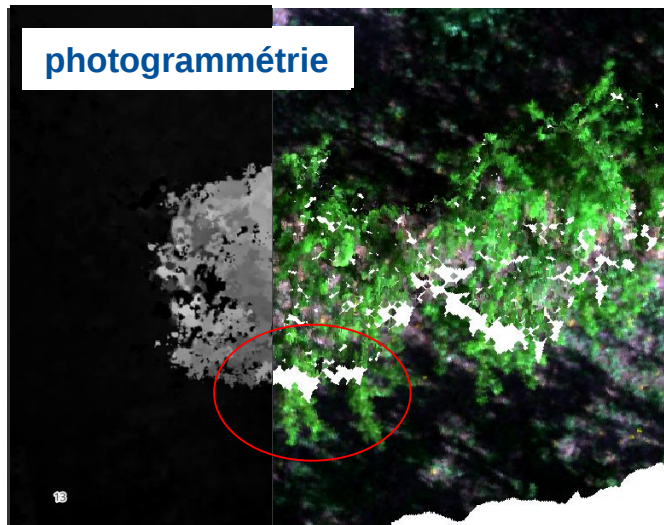
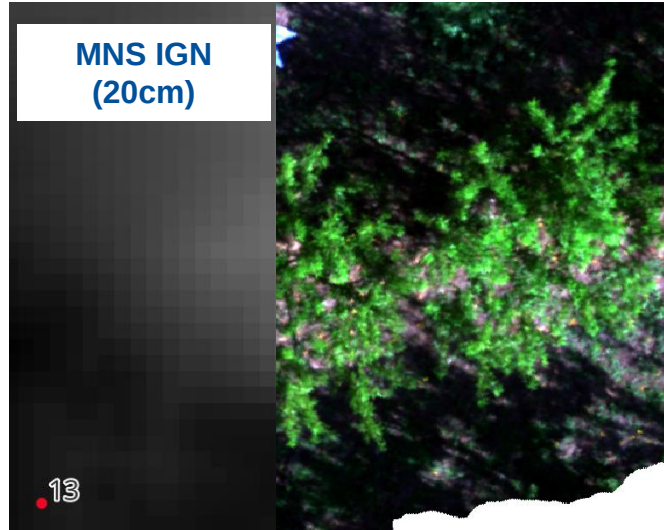
IGN LiDAR HD



LiDAR



# Orthorectification Résultats



# Comparaison MNS : écarts altimétriques absolus

**MNS IGN** : 10 à 30cm d'écart par rapport à la référence GNSS

**MNS LiDAR et photogrammétrie :**

- cohérents entre eux

|             | MNS<br>IGN<br>(20cm) | LiDAR | Photogrammétrie | IGN LiDAR<br>HD |
|-------------|----------------------|-------|-----------------|-----------------|
| RMSE Z (cm) | 29.5                 | 4.8   | 4.5             | 13.1            |

# Comparaison MNS : écarts altimétriques absolus

**MNS IGN** : 10 à 30cm d'écart par rapport à la référence GNSS

**MNS LiDAR et photogrammétrie :**

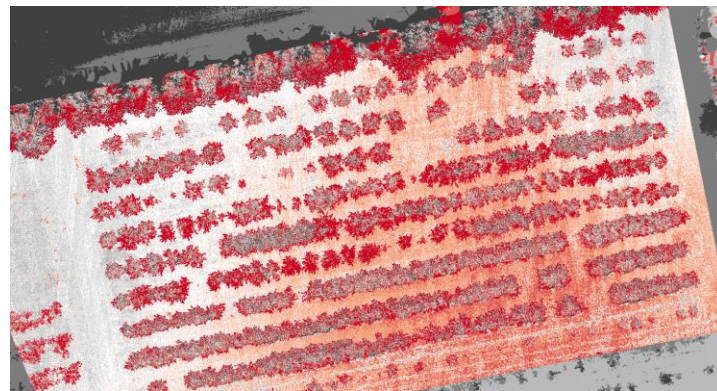
- cohérents entre eux

**Visuellement** : LiDAR plus fidèle sur les branches et la partie extérieure de l'arbre

|             | MNS<br>IGN<br>(20cm) | LiDAR | Photogrammétrie | IGN LiDAR<br>HD |
|-------------|----------------------|-------|-----------------|-----------------|
| RMSE Z (cm) | 29.5                 | 4.8   | 4.5             | 13.1            |



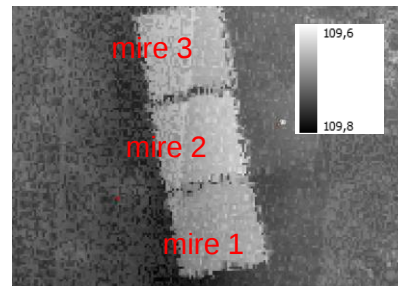
Carte écart altimétrique photogrammétrie – LiDAR  
(en mètres)



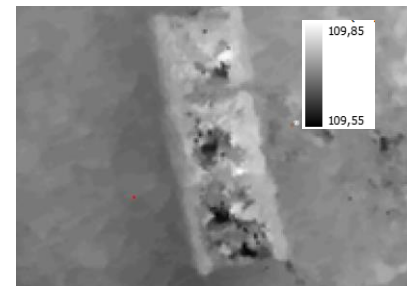
# Comparaison MNS : dispersion altimétrique

⇒ LiDAR meilleur sur les mires (moins grande dispersion)

|              | LiDAR  | Photogrammétrie |
|--------------|--------|-----------------|
|              | cibles | cibles          |
| Range Z (cm) | 7.13   | 30.1            |
| variance     | 0.20   | 2.9             |



LiDAR

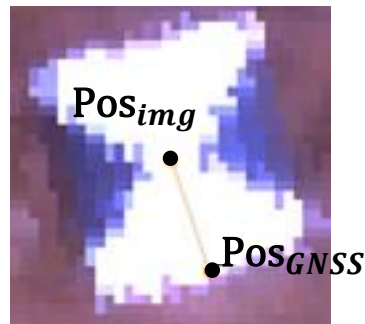


photogrammétrie

# Comparaison MNS : écarts planimétriques absolus

- 22 mires au sol
- 73 mesures
- 8 lignes de vol

|              | MNS<br>IGN<br>(20cm) | GNSS  | LiDAR | Photogram-<br>métrie | IGN LiDAR<br>HD |
|--------------|----------------------|-------|-------|----------------------|-----------------|
| RMSE XY (cm) | 6,9                  | 5,3   | 5,2   | 5,2                  | 5,7             |
| Variance     | 0,035                | 0,019 | 0,019 | 0,019                | 0,029           |



Résultats :

- **MNS IGN** moins bon
- **LiDAR / GNSS / Photo** : pas de différence

# Comparaison MNS : écarts relatifs sur la canopée

MNS IGN / GNSS (sol) : Arbre 1 : impact de la date sur l'acquisition

MNS LiDAR / Photo : cohérents entre eux

| Etiquettes<br>Z (m)                      | MNS IGN<br>(20cm) | GNSS | LiDAR | photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|------------------------------------------|-------------------|------|-------|---------------------|--------------------|
| moyenne au<br>dessus du<br>sol (109.55m) | 0.13              | 0    | 1.65  | 1.54                | 0.13               |



| Etiquettes<br>Z (m)                      | MNS IGN<br>(20cm) | GNSS | LiDAR | photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|------------------------------------------|-------------------|------|-------|---------------------|--------------------|
| moyenne au<br>dessus du<br>sol (109.45m) | 0.76              | 0    | 2.10  | 1.33                | 1.16               |



# Comparaison MNS : écarts relatifs sur la canopée

**MNS IGN / GNSS (sol) :** Arbre 1 : impact de la date sur l'acquisition

**MNS LiDAR / Photo :** cohérents entre eux. écart de hauteur + angle de visée => de 10 à 20cm en planimétrie

| Etiquettes<br>Z (m)                      | MNS IGN<br>(20cm) | GNSS | LiDAR | photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|------------------------------------------|-------------------|------|-------|---------------------|--------------------|
| moyenne au<br>dessus du<br>sol (109.55m) | 0.13              | 0    | 1.65  | 1.54                | 0.13               |



| Ecart<br>relatif XY<br>(cm) | MNS<br>IGN<br>(20cm) | LiDAR | Photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|-----------------------------|----------------------|-------|---------------------|--------------------|
| GNSS                        | 1                    | 14.4  | 14.1                | 4.3                |

| Etiquettes<br>Z (m)                      | MNS IGN<br>(20cm) | GNSS | LiDAR | photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|------------------------------------------|-------------------|------|-------|---------------------|--------------------|
| moyenne au<br>dessus du<br>sol (109.45m) | 0.76              | 0    | 2.10  | 1.33                | 1.16               |



| Ecart<br>relatif XY<br>(cm) | MNS<br>IGN<br>(20cm) | LiDAR | Photogra<br>mmetrie | IGN<br>LiDAR<br>HD |
|-----------------------------|----------------------|-------|---------------------|--------------------|
| GNSS                        | 10.1                 | 19.7  | 13.8                | 11.5               |

# Conclusion

---

Que nous apporte le MNS haute résolution pour ce cas d'étude ?

- Cibles au sol : gain minime . RMSE XY 6.9cm / 5,1px -> 5,2cm / 3,9px
- Cibles canopée : gain 10 à 20cm / 7,6 à 15,2px ( dépendant de la hauteur / angle de visée)

**Visuellement** : LiDAR > photogrammétrie sur les éléments complexes (arbres / feuilles)

**Limites** : Les sources d'erreur sur le géoréférencement sont nombreuses et multi-factorielles (et peuvent largement atteindre la dizaine de cm, Turner and al. 2017 [2]) avant de s'attaquer à la qualité du MNS.

Impact des années d'acquisition sur le MNS

# Conclusion et perspectives

## Recommandations

Si l'aspect géométrique / géoréférencement du sursol n'est pas critique :

⇒ MNT fait à partir de cibles GNSS suffisant et simple à mettre en place et donne une bonne lisibilité des données

Si possible pour le sursol : privilégier le LiDAR

Dans tous les cas :

⇒ Un recalage manuel sera nécessaire. Prévoir des cibles / objets visibles dans toutes les acquisitions (Visible et LiDAR) pour les aligner

## Perspectives :

⇒ Impact de la bande spectrale utilisée pour la photogrammétrie

⇒ Répéter l'analyse comparative sur d'autres cas d'application avec des cibles géométriques maîtrisées



---

# Merci pour votre attention

Des questions ?

# Références

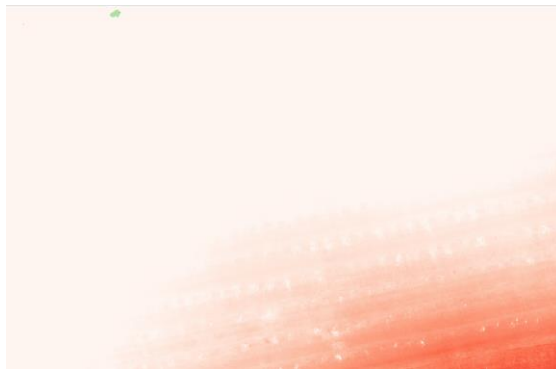
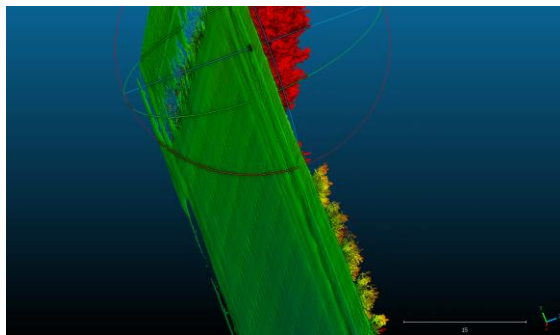
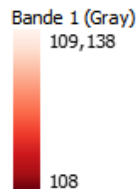
---

1. **Variabilité intra-individu de la biochimie foliaire de la canopée d'arbres en verger par télédétection au service de l'agroécologie – CANOP**, K. Adeline (2023), <https://anr.fr/Projet-ANR-22-CE04-0002>
2. **PUSHBROOM HYPERSPECTRAL IMAGING FROM AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM (UAS) – GEOMETRIC PROCESSING WORKFLOW AND ACCURACY ASSESSMENT**, D. Turner and Al (2017), The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences

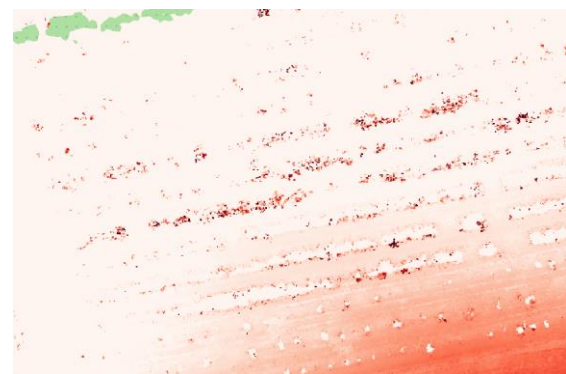
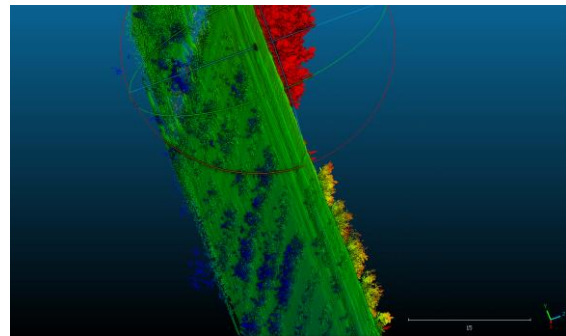
# Comparaison MNS : dispersion altimétrique

Carte des minimum d'altitude

⇒ La photogrammétrie crée plus de points fantômes que le LiDAR



LiDAR



Photogrammétrie