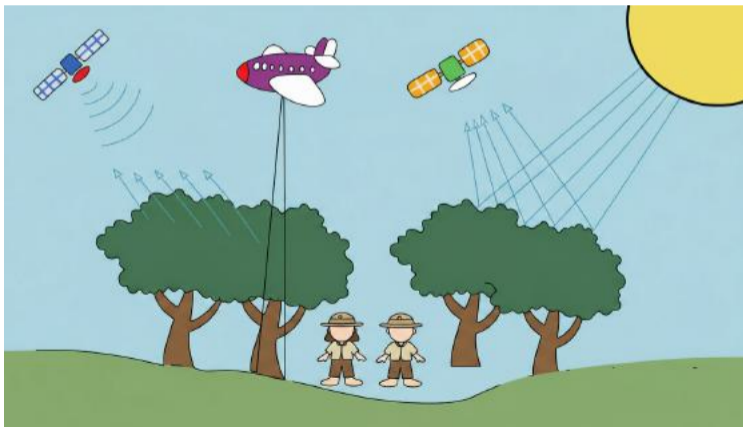


# Observer les forêts autrement : quand inventaire, satellites et intelligence artificielle travaillent ensemble

Nikola Besic (LIF - IGN, ✉ [nikola.besic@ign.fr](mailto:nikola.besic@ign.fr) 🌐 [nbesic.github.io](https://nbesic.github.io) 🐦 [@nikobesic.bsky.social](https://twitter.com/nikobesic.bsky.social))

ASP Forêt de Haye,  
Nancy, le 5 décembre 2025

”POUR UNE SCIENCE BELLE,  
UTILE ET PARTAGÉE.”



Nikola Besic, né le 7 novembre 1987



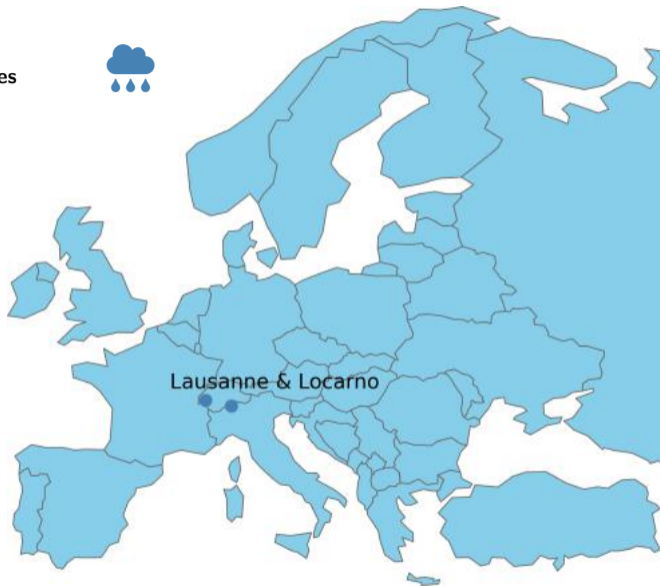
## 2014, Doctorat à l'Université Grenoble Alpes (GIPSA-lab, en collab. avec EDF)

- Comment extraire **un maximum d'informations à partir des données de téledétection** ?
- Comment estimer **l'équivalent en eau du manteau neigeux alpin** ?



## 2015 - 2019, l'EPFL et Météo Suisse

- Comment réconcilier **les connaissances physiques et le pouvoir de la donnée** ?
- En quoi la **meilleure caractérisation des précipitations** améliore la connaissance des processus atmosphériques et son modélisation ?



## 2019 - 2021, Météo-France

- Comment réconcilier **les connaissances physiques et le pouvoir de la donnée** ?
- En quoi **la meilleure caractérisation des précipitations** améliore la connaissance des processus atmosphériques et son modélisation ?



## 2021 - ..., AgroParisTech & IGN

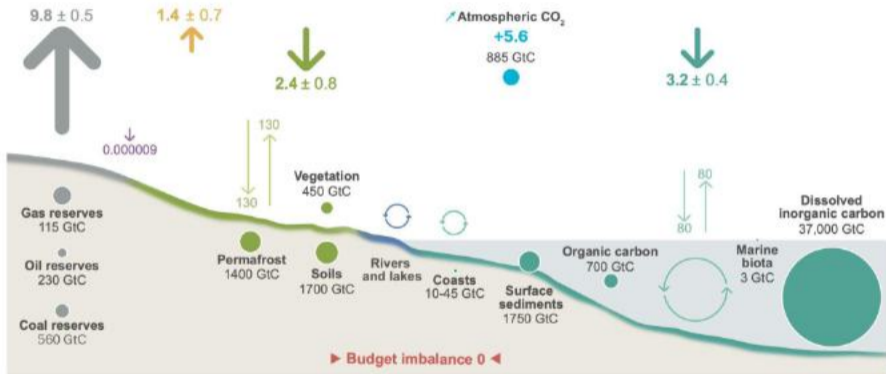
- Comment estimer spatialement les stocks et les flux de biomasse forestière ?
- Comment améliorer les projections forestières face aux changements climatiques ?



## Pourquoi la biomasse ?

(P. Friedlingstein, et al., Global Carbon Budget 2025, ESSD, 2025.)

# The global carbon cycle



Anthropogenic fluxes  
2015-2024 average  
GtC per year

↑ Fossil CO<sub>2</sub> E<sub>FOS</sub>

↑ Land-use change E<sub>LUC</sub>

↓ CDR not included in E<sub>LUC</sub>

↓ Land uptake S<sub>LAND</sub>

↓ Ocean uptake S<sub>OCEAN</sub>

+ Atmospheric increase G<sub>ATM</sub>

▶ Budget imbalance B<sub>IM</sub>

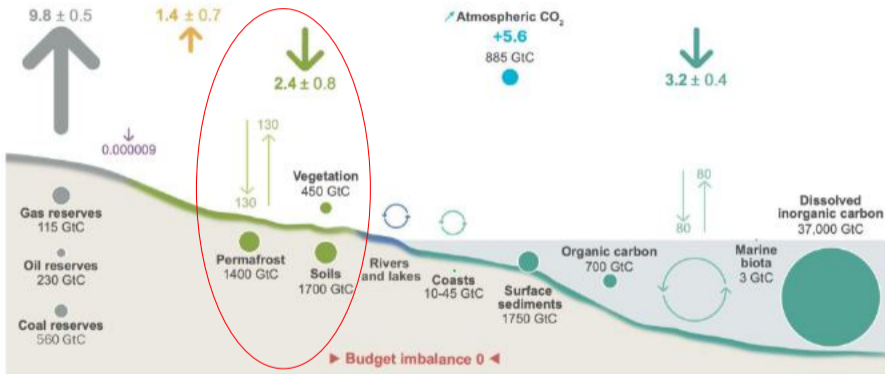
● Stocks GtC

↕ Natural carbon fluxes in GtC

## Pourquoi la biomasse ?

(P. Friedlingstein, et al., Global Carbon Budget 2025, ESSD, 2025.)

# The global carbon cycle



Anthropogenic fluxes  
2015-2024 average  
GtC per year

↑ Fossil CO<sub>2</sub> E<sub>FOS</sub>

↑ Land-use change E<sub>LUC</sub>

↓ CDR not included in E<sub>LUC</sub>

↓ Land uptake S<sub>LAND</sub>

↓ Ocean uptake S<sub>OCEAN</sub>

+ Atmospheric increase G<sub>ATM</sub>

▶ Budget imbalance B<sub>IM</sub>

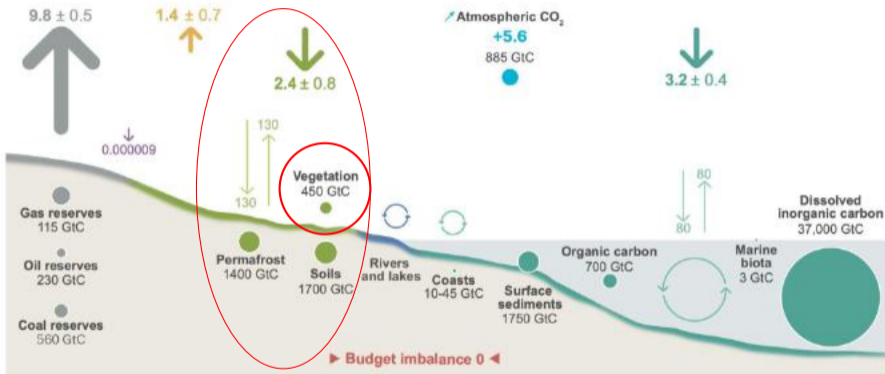
● Stocks GtC

↕ Natural carbon fluxes in GtC

## Pourquoi la biomasse ?

(P. Friedlingstein, et al., Global Carbon Budget 2025, ESSD, 2025.)

# The global carbon cycle



Anthropogenic fluxes  
2015-2024 average  
GtC per year

↑ Fossil CO<sub>2</sub> E<sub>FOS</sub>

↑ Land-use change E<sub>LUC</sub>

↓ CDR not included in E<sub>LUC</sub>

↓ Land uptake S<sub>LAND</sub>

↓ Ocean uptake S<sub>OCEAN</sub>

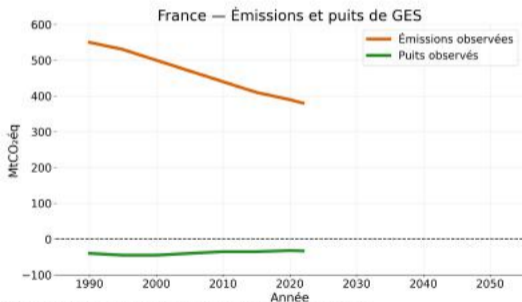
+ Atmospheric increase G<sub>ATM</sub>

▶ Budget imbalance B<sub>IM</sub>

● Stocks GtC

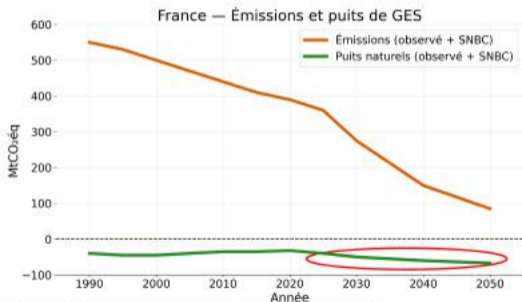
↕ Natural carbon fluxes in GtC

## Pourquoi la biomasse ?



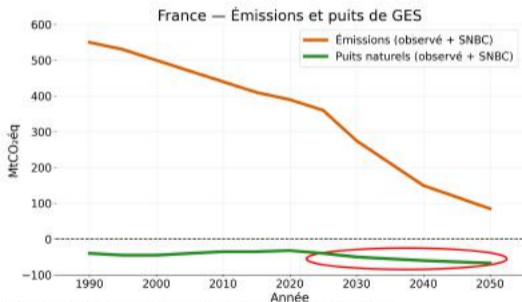
Chiffres reconstruits d'après les sources fidèles aux ordres de grandeur officiels : CITEPA, UICATIF

# Pourquoi la biomasse ?

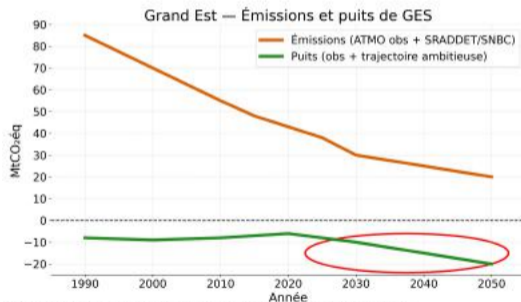


Chiffres reconstruits d'après les sources fidèles aux ordres de grandeur officiels : CITEPA, UTCAIF, SNBC.

## Pourquoi la biomasse ?



Chiffres reconstruits d'après les sources (fidèles aux ordres de grandeur officiels) : CITEPA, UTCATP, SNBC



Chiffres reconstruits d'après les sources (fidèles aux ordres de grandeur officiels) : ATMO Grand Est, SRADET

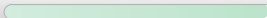
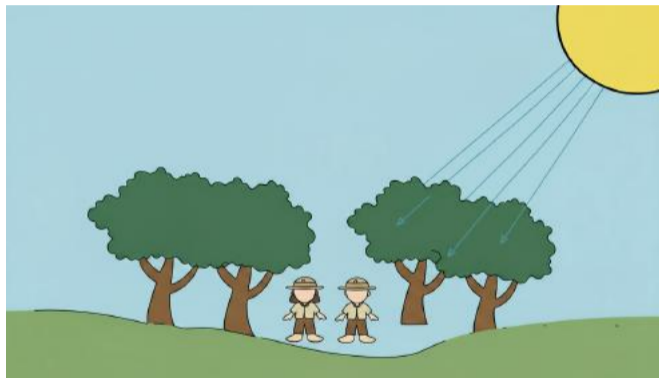
Moi

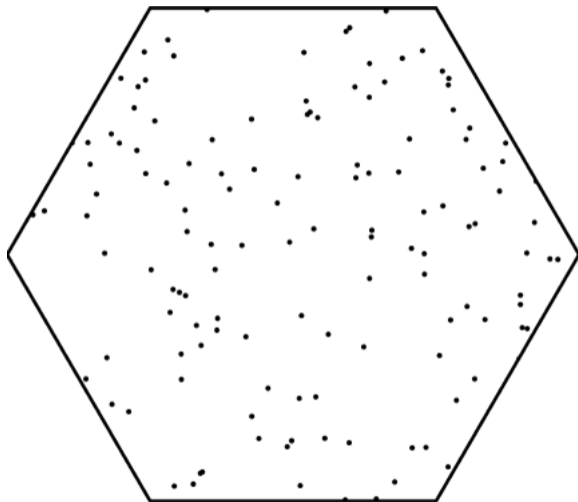
**IFN**

Téledétection

Téledétection + IFN

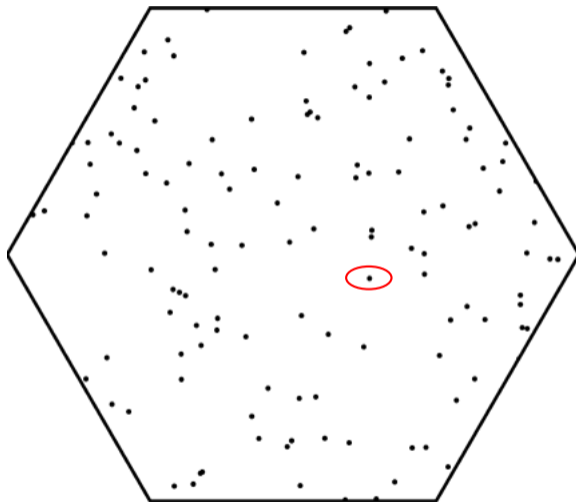
...





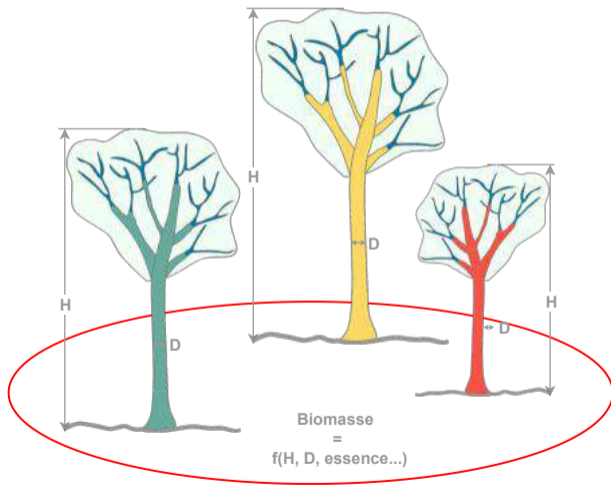
## Estimations de l'Inventaire Forestier National (IFN) :

- Échantillon spatial aléatoire, conditionné par la photo-interprétation
- Mesures locales des hauteurs, diamètres, etc., permettant d'estimer localement le stock de volume de bois, de biomasse aérienne, etc.
- Inférence de ces variables pour des territoires allant de l'échelle nationale aux régions administratives, départements, etc.
- Pas de biais, mais une variance de l'échantillonnage (incertitude) potentiellement importante



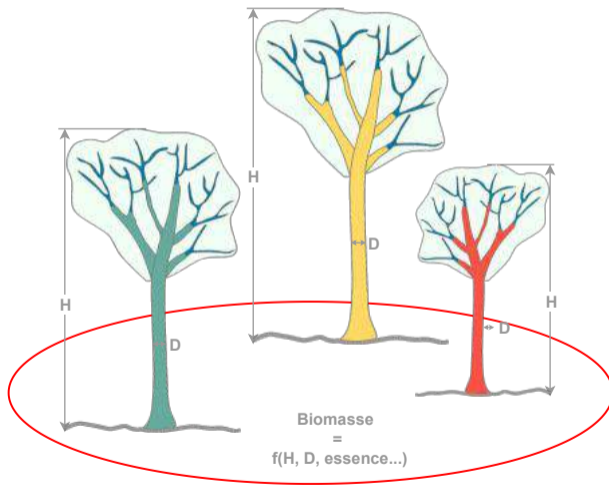
## Estimations de l'Inventaire Forestier National (IFN) :

- Échantillon spatial aléatoire, conditionné par la photo-interprétation
- Mesures locales des hauteurs, diamètres, etc., permettant d'estimer localement le stock de volume de bois, de biomasse aérienne, etc.
- Inférence de ces variables pour des territoires allant de l'échelle nationale aux régions administratives, départements, etc.
- Pas de biais, mais une variance de l'échantillonnage (incertitude) potentiellement importante



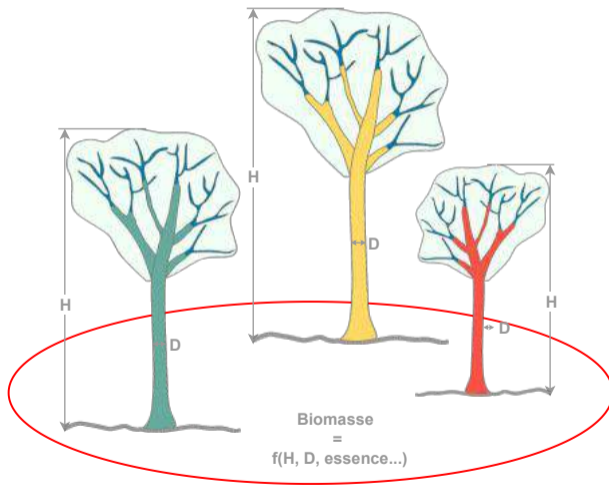
## Estimations de l'Inventaire Forestier National (IFN) :

- Échantillon spatial aléatoire, conditionné par la photo-interprétation
- Mesures locales des hauteurs, diamètres, etc., permettant d'estimer localement le stock de volume de bois, de biomasse aérienne, etc.
- Inférence de ces variables pour des territoires allant de l'échelle nationale aux régions administratives, départements, etc.
- Pas de biais, mais une variance de l'échantillonnage (incertitude) potentiellement importante



## Estimations de l'Inventaire Forestier National (IFN) :

- Échantillon spatial aléatoire, conditionné par la photo-interprétation
- Mesures locales des hauteurs, diamètres, etc., permettant d'estimer localement le stock de volume de bois, de biomasse aérienne, etc.
- Inférence de ces variables pour des territoires allant de **l'échelle nationale aux régions administratives, départements, etc.**
- Pas de biais, mais une variance de l'échantillonnage (incertitude) potentiellement importante



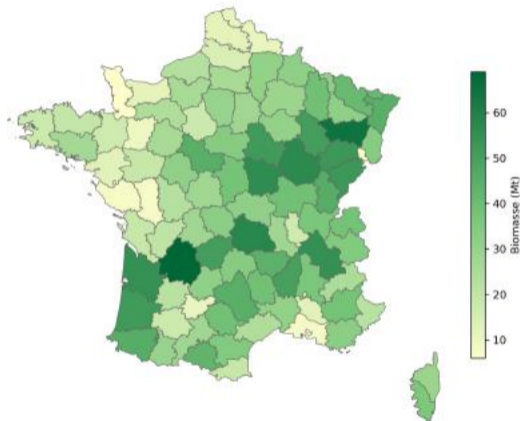
## Estimations de l'Inventaire Forestier National (IFN) :

- Échantillon spatial aléatoire, conditionné par la photo-interprétation
- Mesures locales des hauteurs, diamètres, etc., permettant d'estimer localement le stock de volume de bois, de biomasse aérienne, etc.
- Inférence de ces variables pour des territoires allant de **l'échelle nationale aux régions administratives, départements, etc.**
- Pas de biais, mais **une variance de l'échantillonnage (incertitude) potentiellement importante**

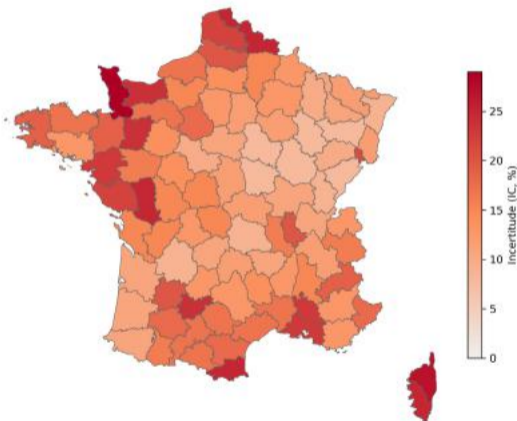


## Inférence des stocks par département (2020 - 2024) :

Biomasse (aérienne + racinaire)

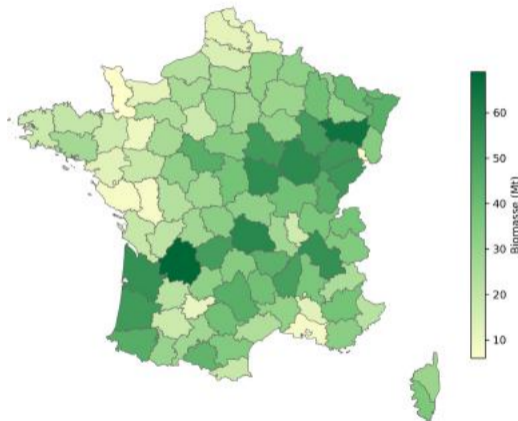


Incertitude

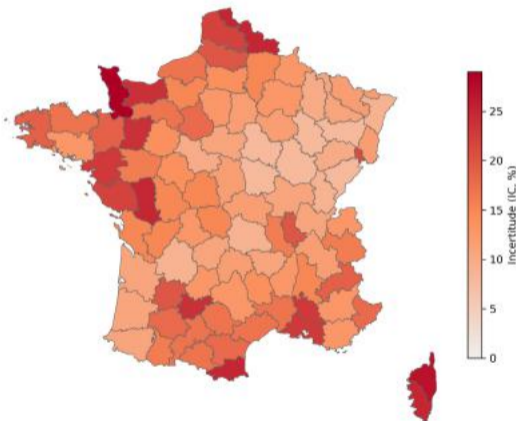


## Inférence des stocks par département (2020 - 2024) :

Biomasse (aérienne + racinaire)



Incertitude



Et si on veut un rapportage annuel - à cause des perturbations etc. - ET voir ce qui se passe à l'échelle des massifs forestiers, des communautés de communes, etc. ?

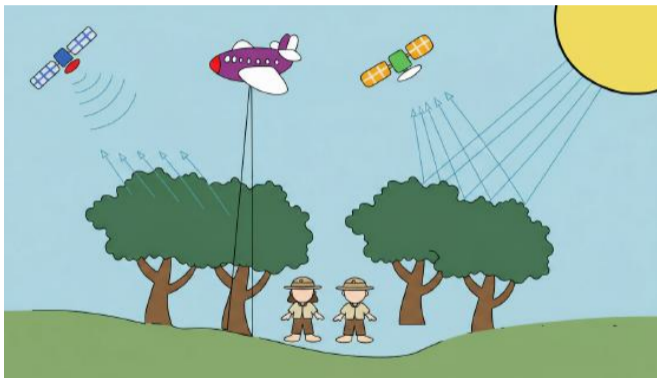
Moi

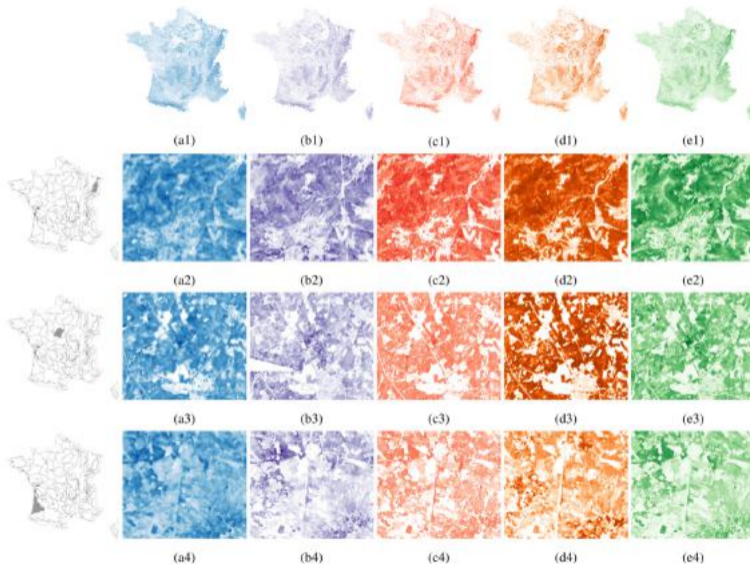
IFN

**Téledétection**

Téledétection + IFN

...



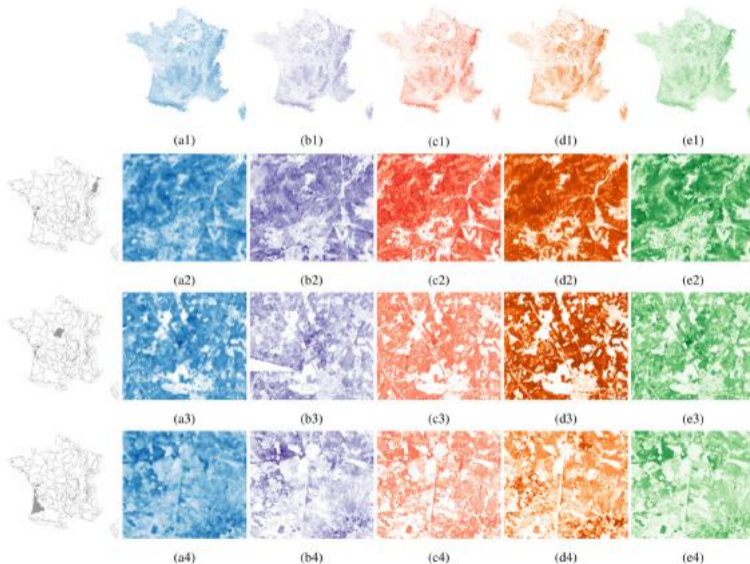


Le plus évident à faire :  
spatialiser la hauteur de  
la canopée

(N. Besic, N. Picard, C. Vega, J.-D. Bontemps, L. Hertzog, J.-P. Renaud, F. Fogel, M. Schwartz, A. Pellissier-Tanon, G. Destouet, F. Mortier, M. Planells-Rodriguez, and P. Ciais, "Remote sensing-based forest canopy height mapping: some models are useful, but might they provide us with even more insights when combined?," *Geoscientific Model Development*, 18, 337–359, 2025. DOI: 10.5194/gmd-18-337-2025)

(a - c) différents modèles

1 - Vosges, 2 - Sologne, 3 - Landes



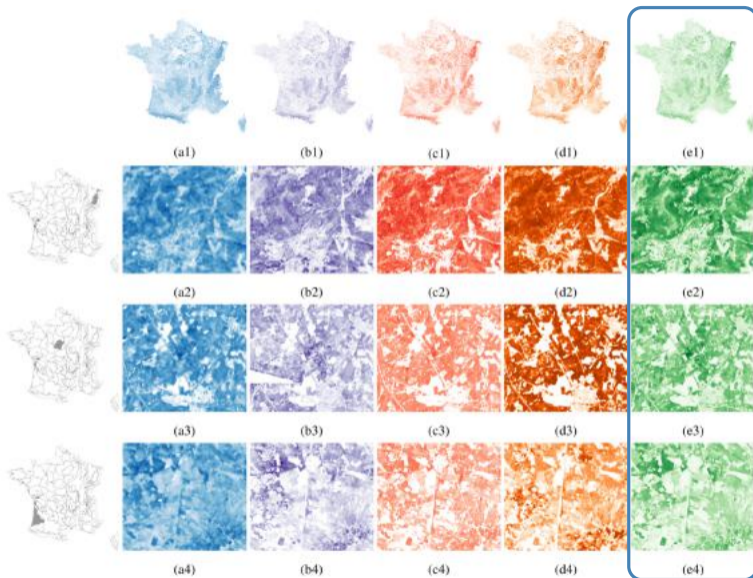
Le plus évident à faire :  
spatialiser la hauteur de  
la canopée

Et on le fait bien !

(N. Besic, N. Picard, C. Vega, J.-D. Bontemps, L. Hertzog, J.-P. Renaud, F. Fogel, M. Schwartz, A. Pellissier-Tanon, G. Destouet, F. Mortier, M. Planells-Rodriguez, and P. Ciais, "Remote sensing-based forest canopy height mapping: some models are useful, but might they provide us with even more insights when combined?," *Geoscientific Model Development*, 18, 337–359, 2025. DOI: 10.5194/gmd-18-337-2025)

(a - c) différents modèles

1 - Vosges, 2 - Sologne, 3 - Landes



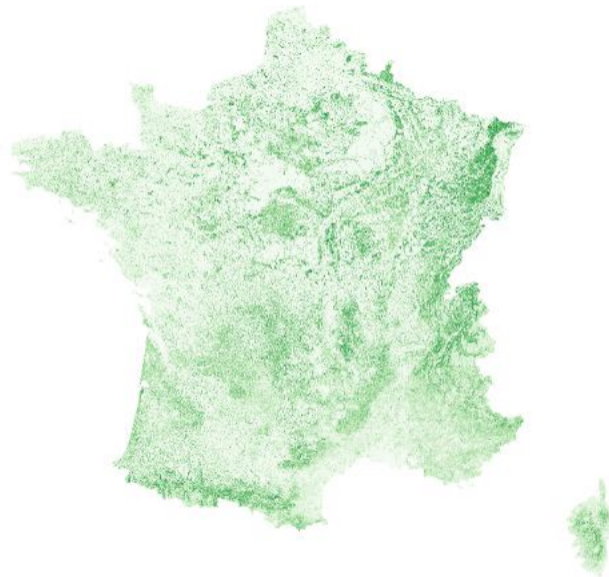
Le plus évident à faire :  
spatialiser la hauteur de  
la canopée

Et on le fait bien !

(N. Besic, N. Picard, C. Vega, J.-D. Bontemps, L. Hertzog, J.-P. Renaud, F. Fogel, M. Schwartz, A. Pellissier-Tanon, G. Destouet, F. Mortier, M. Planells-Rodriguez, and P. Ciais, "Remote sensing-based forest canopy height mapping: some models are useful, but might they provide us with even more insights when combined?," *Geoscientific Model Development*, 18, 337–359, 2025. DOI: 10.5194/gmd-18-337-2025)

(a - c) différents modèles

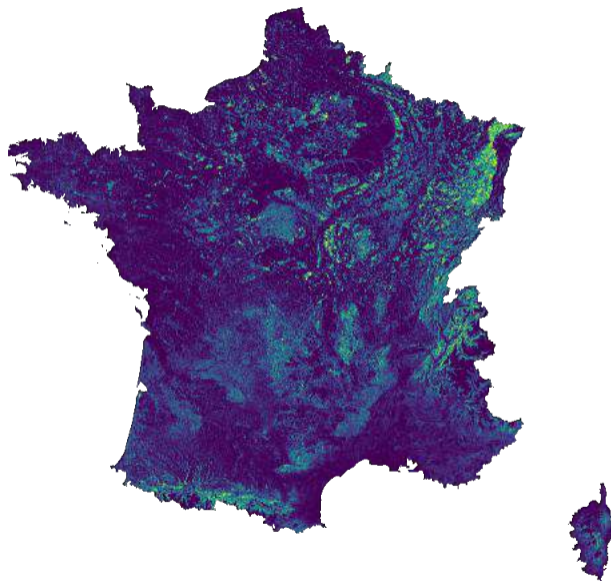
1 - Vosges, 2 - Sologne, 3 - Landes



Le plus évident à faire :  
spatialiser la hauteur de  
la canopée

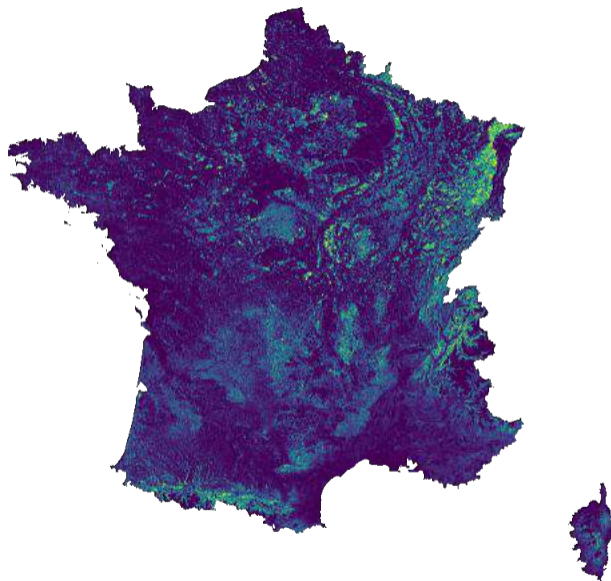
**Et on le fait bien !**

(M. Schwartz, et al., FORMS, ESSD, 2023.)



Et la biomasse alors ?

(M. Schwartz, et al., FORMS, ESSD, 2023.)

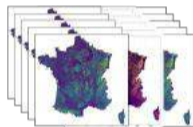


Et la biomasse alors ?

On le fait un peu moins bien...

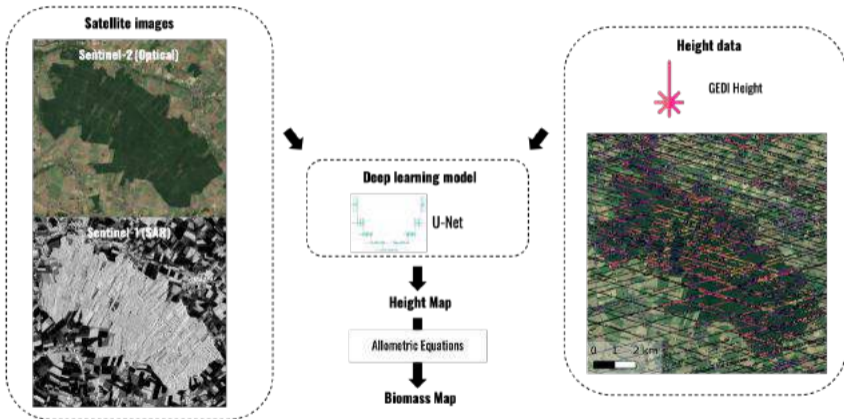
(M. Schwartz, et al., FORMS, ESSD, 2023.)

## Pourquoi ?

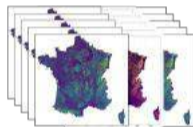
**FORMS-T**

Height, Biomass, Wood Volume for  
2018-2024

(M. Schwartz, P. Ciais, E. Sean, A. de Truchis, C. Vega, N. Besic, I. Fayad, J.-P. Wigneron, S. Brood, A. Pelissier-Tanon, J. Pauls, G. Belouze, and Y. Xu, "Retrieving yearly forest growth from satellite data: A deep learning based approach," Remote Sensing of Environment, Volume 330, 2025. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114959)

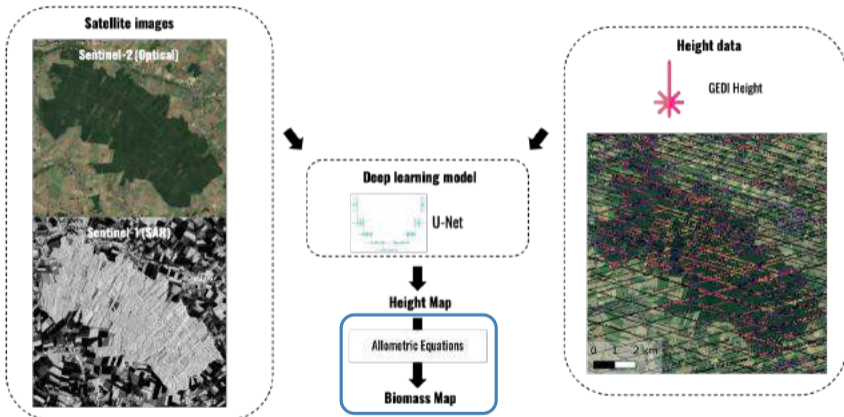


## Pourquoi ?

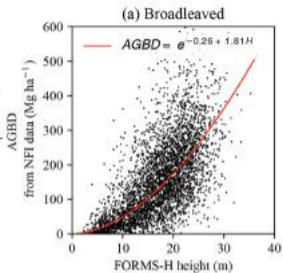
**FORMS-T**

Height, Biomass, Wood Volume for  
2018-2024

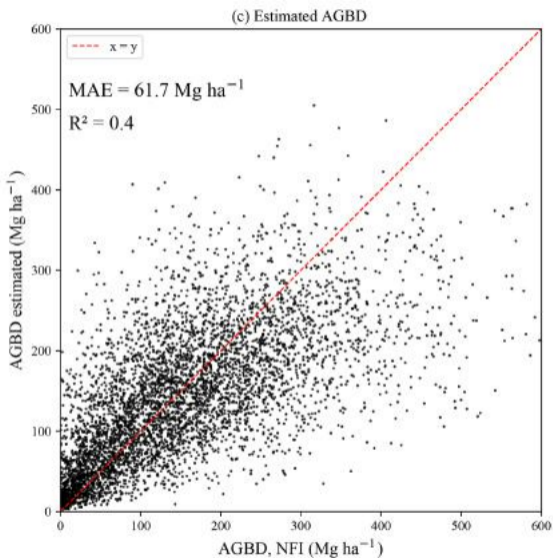
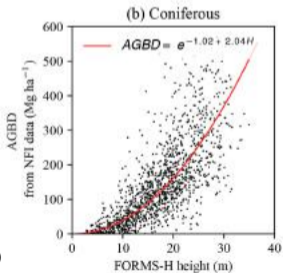
(M. Schwartz, P. Ciais, E. Sean, A. de Truchis, C. Vega, N. Besic, I. Fayad, J.-P. Wigneron, S. Brood, A. Pelissier-Tanon, J. Pauls, G. Belouze, and Y. Xu, "Retrieving yearly forest growth from satellite data: A deep learning based approach," Remote Sensing of Environment, Volume 330, 2025. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114959)



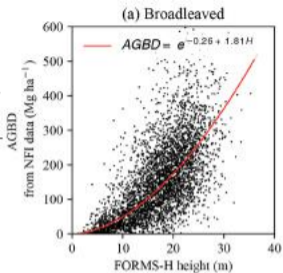
(M. Schwartz, et al.: FORMS: Forest Multiple Source height, wood volume, and biomass maps in France at 10 to 30 m resolution based on Sentinel-1, Sentinel-2, and Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) data with a deep learning approach, Earth Syst. Sci. Data, 15, 4927–4945, 2023, DOI: 10.5194/essd-15-4927-2023)



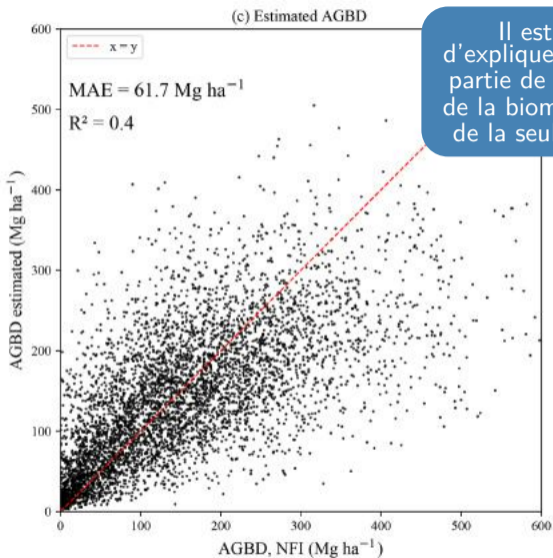
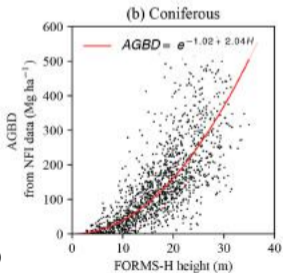
(Y. Su, M. Schwartz, I. Fayad, M. Garcia, M. Zavala, J. Tijerin-Trivino, J. Astigarraga, V. Cruz-Alonso, S. Liu, X. Zhang, S. Chen, F. Ritter, N. Besic, A. d'Aspremont, and P. Ciaï, "Canopy height and biomass distribution across the forests of Iberian peninsula," Nature Research - Scientific Data, 12, 678, 2025. DOI: 10.1038/s41597-025-05021-9)



(M. Schwartz, et al.: FORMS: Forest Multiple Source height, wood volume, and biomass maps in France at 10 to 30 m resolution based on Sentinel-1, Sentinel-2, and Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) data with a deep learning approach, Earth Syst. Sci. Data, 15, 4927–4945, 2023, DOI: 10.5194/essd-15-4927-2023)

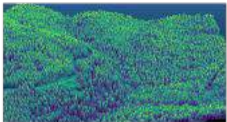


(Y. Su, M. Schwartz, I. Fayad, M. Garcia, M. Zavala, J. Tijerín-Trivino, J. Astigarraga, V. Cruz-Alonso, S. Liu, X. Zhang, S. Chen, F. Ritter, N. Besic, A. d'Aspremont, and P. Ciais, "Canopy height and biomass distribution across the forests of Iberian peninsula," Nature Research - Scientific Data, 12, 678, 2025. DOI: 10.1038/s41597-025-05021-9)



Il est difficile d'expliquer une grande partie de la variabilité de la biomasse à partir de la seule hauteur...

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

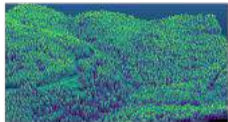
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2014**

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

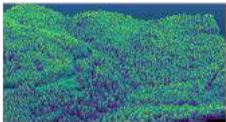
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2015**

## Open-Canopy project



Lidar HD



Vision transformer model



SPOT

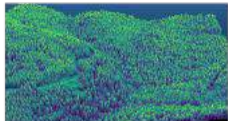
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

2016

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



Vision transformer model



**SPOT**

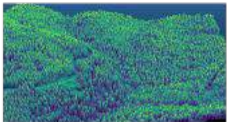
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2017**

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

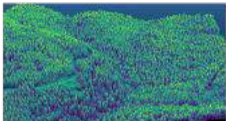
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2018**

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



Vision transformer model



**SPOT**

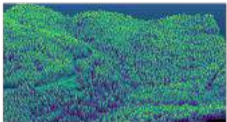
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2019**

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

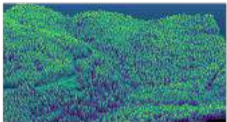
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2020**

## Open-Canopy project



Lidar HD



Vision transformer model



SPOT

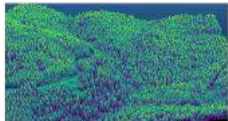
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

2021

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

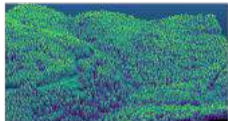
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2022**

## Open-Canopy project



**Lidar HD**



**Vision transformer model**



**SPOT**

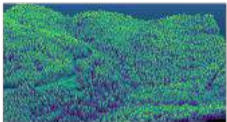
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

**2023**

## Open-Canopy project



Lidar HD



Vision transformer model



SPOT

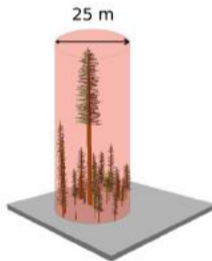
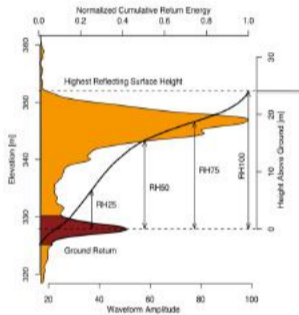
(F. Fogel, Y. Perron, N. Besic, L. Saint-André, A. Pellissier-Tanon, M. Schwartz, T. Boudras, I. Fayad, A. d'Aspremont, L. Landrieu, and P. Ciais, "Open-Canopy: Towards Very High Resolution Forest Monitoring," Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition Conference (CVPR), pp. 1395-1406, 2025.)



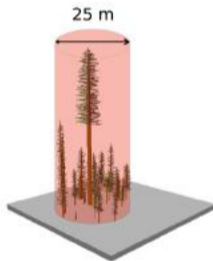
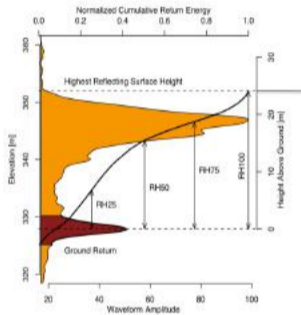
En attendant, la hauteur fait déjà un super boulot - on détecte des changements à une échelle de 1,5 m !

2024

# Comment améliorer la spatialisation de la biomasse en France métropolitaine ?



# Comment améliorer la spatialisation de la biomasse en France métropolitaine ?



**Téledétection et inventaire forestier : vers une cartographie à plus haute résolution spatio-temporelle des attributs forestiers en France métropolitaine**

FR | EN

**Auteur / Autrice :** Selim Behloul

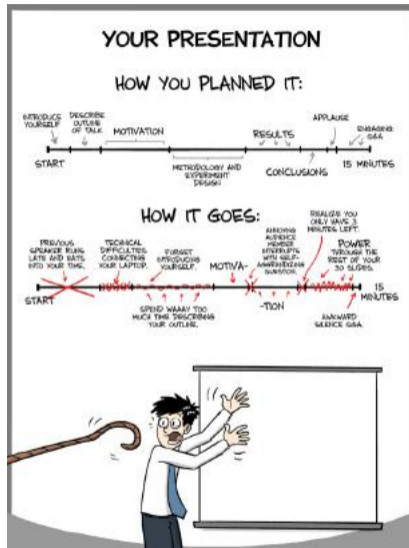
Moi

IFN

Télédetection

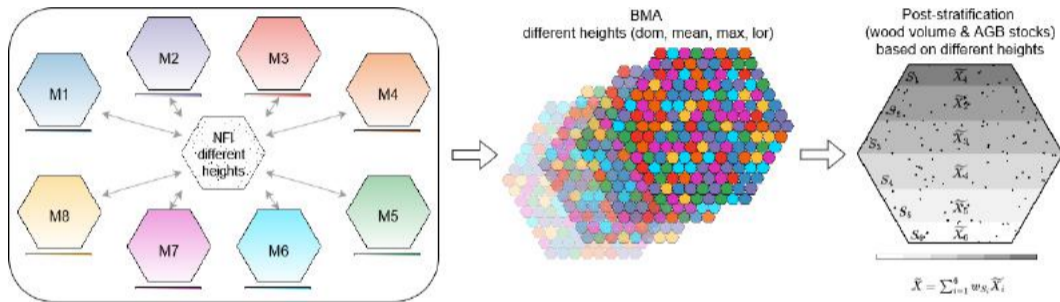
Télédetection + IFN

...



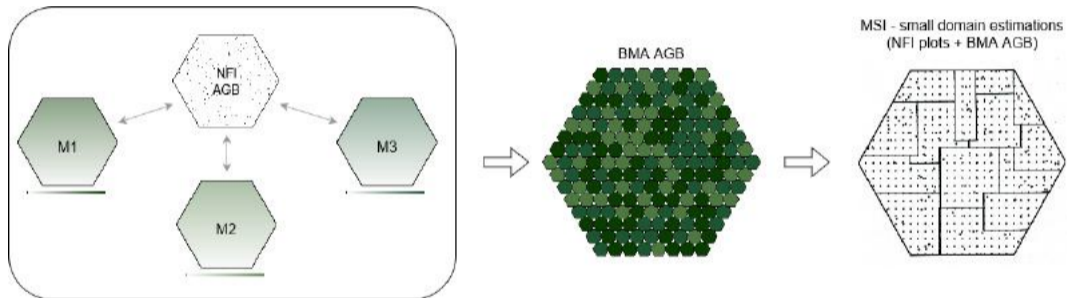
source : PHD comics

## Application à la post-stratification d'un inventaire forestier à grande échelle



Exploiter la complémentarité des modèles d'IA pour affiner les inventaires forestiers à grande échelle via une nouvelle post-stratification, réduisant la variance et améliorant la précision des estimations de biomasse.

## Vers un inventaire forestier à grande échelle assisté par télédétection



Améliorer la précision spatiale tout en préservant l'absence de biais grâce aux Inventaires Multi-Sources

Merci beaucoup  
pour votre attention  
! :)



©Le Monde