



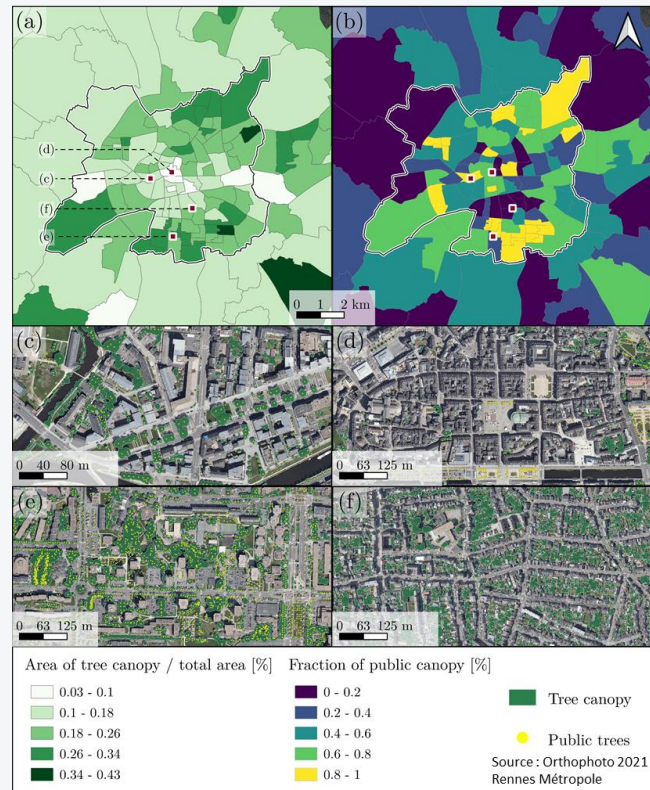
*Mesures in situ de variables biophysiques de la végétation en milieu urbain
: protocoles, publications, validation de produits satellitaires*

Comprendre l'état de santé des arbres de la ville de Rennes

- 130 000 arbres
- 24 000 arbres plantés (2020-2024)
- 8000 arbres suivis par an



- *Les méthodes de diagnostic in situ sont des approches basées sur l'expertise, chronophages et coûteuses en ressources humaines*



Comprendre l'état de santé des arbres de la ville de Rennes

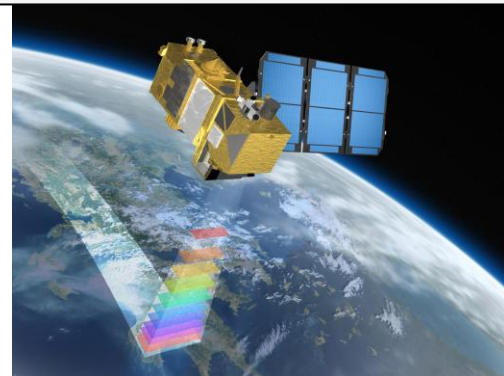
- 130 000 arbres
- 24 000 arbres plantés (2020-2024)
- 8000 arbres suivis par an



- *Les méthodes de diagnostic in situ sont des approches basées sur l'expertise, chronophages et coûteuses en ressources humaines*



L'utilisation de la télédétection satellitaire permet un suivi quantitatif à grande échelle, dans l'espace et dans le temps



Sentinel-2 (ESA, Copernicus) :

Imagerie optique : 0,4 - 2,5 μm

Bandes spectrales : 13

Résolution spatiale : 10 m, 20 m, 60 m

Révisite temporelle : 2-3 jours (UE)

Fauchée : 290 km

Données ouvertes

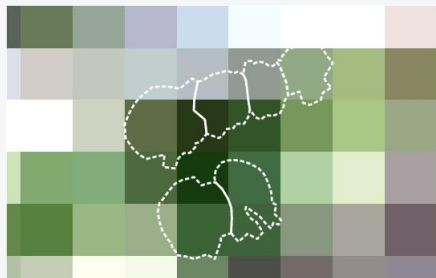
Limites de Sentinel-2 en milieu urbain

- Les pixels contiennent généralement un mélange de contributions : couronnes d'arbres, ombres et surfaces urbaines environnantes (toits, routes, etc.)

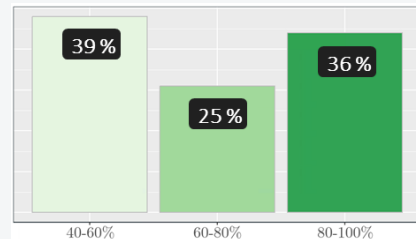
Orthophoto



Sentinel-2 (10 m)



~ 2/3 de pixels
mixtes



Couverture arborée
par pixel (%)

Estimer les traits fonctionnels des arbres à partir d'images Sentinel-2 en développant une méthode physique tenant compte de la complexité sub-pixel du milieu urbain

Traits de végétation



Teneur en
chlorophylle foliaire

Indice ou densité
de surface foliaire

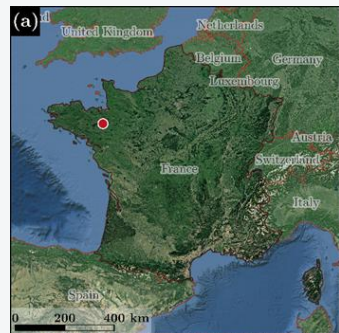
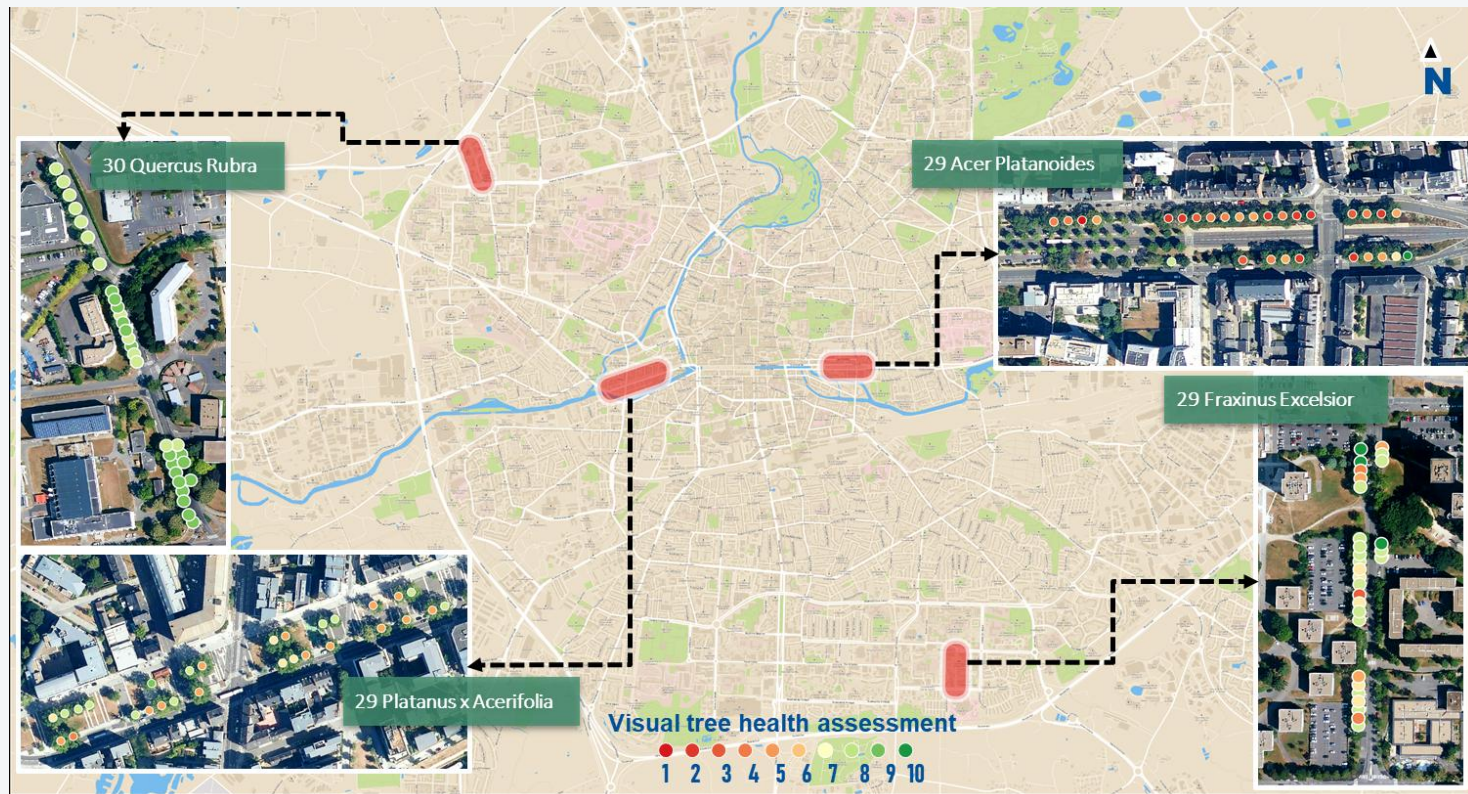
$$LAI = \frac{A \times B}{C}$$

Indicateurs indirects de l'état de santé des arbres

- Dépigmentation liée au stress
- Défoliation/sénescence précoce
- Dommages mécaniques (ex. : taille, tempête, casse de branches)



- 1) Réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les éléments de la scène contribuant le plus au signal Sentinel-2
- 2) Développer un modèle d'inversion hybride contraint pour l'estimation des traits de végétation



Ville de Rennes, France

117 individus Avril – septembre 2021
(8 dates)



4 espèces d'arbres



Platanus acerifolia



Acer platanoides

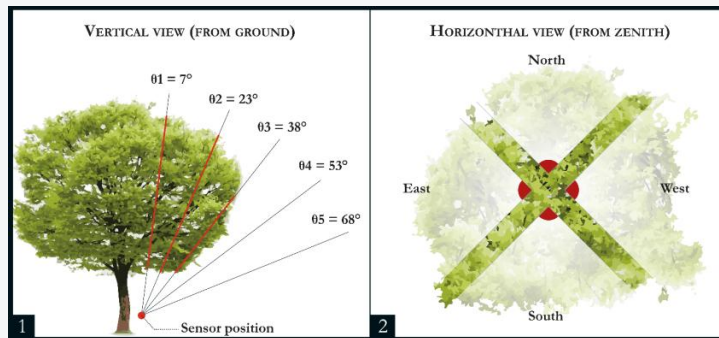


Fraxinus excelsior



Quercus rubra

Mesure du LAI (canopée) – Analyseur de canopée LAI-2200



Mesure de la chlorophylle (feuille) – Pince foliaire Dualox



Défis spécifiques au milieu urbain

- ▶ Arbres isolés ≠ couvert continu homogène (forêt, culture)
- ▶ Hauteur de canopée variable → calcul de longueur de trajet lumineux
- ▶ Obstacles : mobilier urbain, voitures, haies
- ▶ Lumière artificielle nocturne → mesures à l'aube / crépuscule
- ▶ Ombres portées des bâtiments

Solutions adoptées

- ▶ 2 analyseurs LAI-2200 synchronisés (walkie-talkie)
- ▶ Mesures dans les 4 directions cardinales / arbre
- ▶ Capteur à 1 m du tronc, à 1 m de hauteur
- ▶ Cap view 90° pour exclure le tronc
- ▶ Modélisation de la section transversale de couronne (CHM + MNT, 0.5 m – Rennes Métropole)
- ▶ 4 méthodes de calcul (LAI-2200, Lang, Ellipsoïde, CLS)

Dispositif de mesure

- ☀ Mesures à l'aube / crépuscule (lumière diffuse)
- ↑ Opérateur 1 : au-dessus de la canopée (ciel dégagé)
- ↓ Opérateur 2 : sous la canopée × 4 directions (N, E, S, O)
- 📐 Angles 01...05 : 7° , 23° , 38° , 53° , 68°
- 📏 Distance tronc-capteur : 1 m | Hauteur capteur : 1 m

Résultats PAD

0.04 – 1.46 m²/m³

Plage de variation PAD

0.57 m²/m³

Moyenne toutes espèces

AC > QR > FR > PL

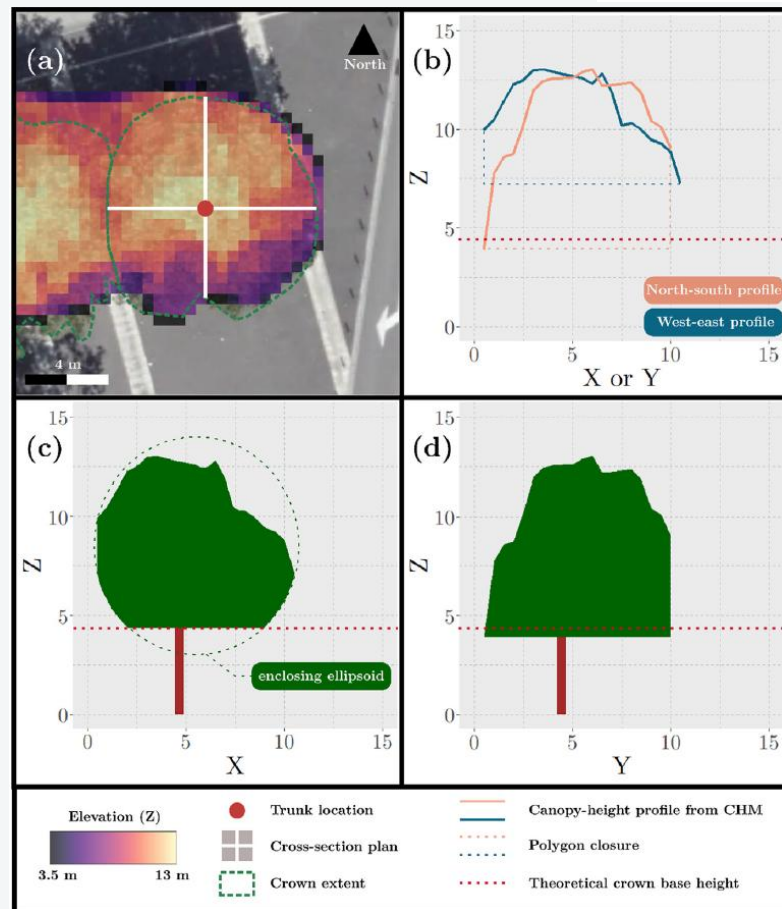
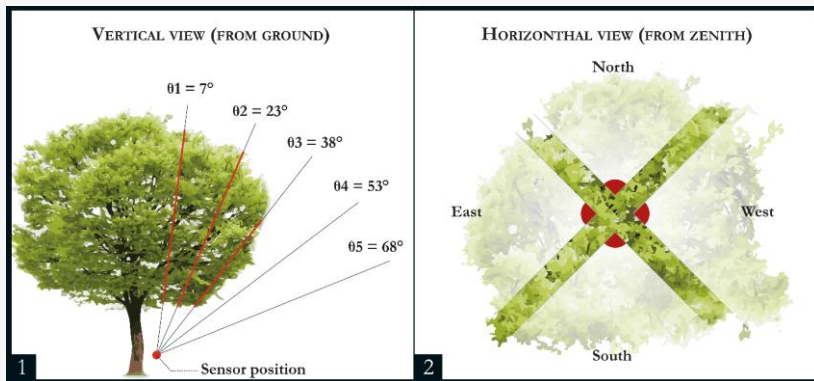
Rang moyen par espèce

Méthode in situ — Dualex 4 Scientific (Force-A)

- ▶ Capteur optique non-destructif (feuille clipée)
- ▶ Mesure simultanée : chlorophylles (Cab), anthocyanines, flavonols, NBI
- ▶ 8 feuilles par arbre (2 × 4 directions cardinales)
- ▶ Prélèvement à la périphérie de la couronne (~6 m) via sécateur télescopique (4 m) + hauteur opérateur
- ▶ Reproductibilité : RMSE = 0.71 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Cerovic et al., 2012)
- ▶ Précision globale : RMSE = 5.03 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
- ▶ Résultats : 11.4 – 49.3 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (moy. 29.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)

Méthode laboratoire — Extraction spectrophotométrique

- ▶ Feuilles stockées à -20°C → lyophilisation
- ▶ Chlorophylles a, b, a+b et caroténoïdes : méthode Lichtenthaler (acétone 80 %)
- ▶ Anthocyanines : méthode Gravot (méthanol + chloroforme)
- ▶ Spectrophotomètre FLX Genius XM (SAFAS)
→ lecture à 470, 646 et 663 nm
- ▶ Cab total : 0.7 – 10.4 $\mu\text{g}/\text{mg MS}$ (moy. 3.6 $\mu\text{g}/\text{mg MS}$)
- ▶ Variabilité saisonnière plus forte pour AC, FR, QR que pour PL
- ▶ Permet la calibration des équations Dualex par espèce

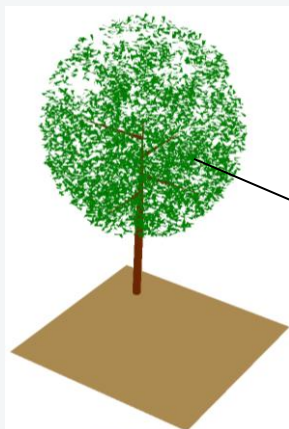


1) Réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les éléments de la scène contribuant le plus au signal Sentinel-2

PAYSAGE RÉEL

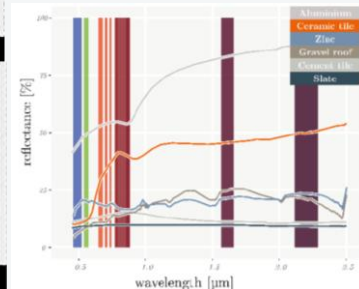
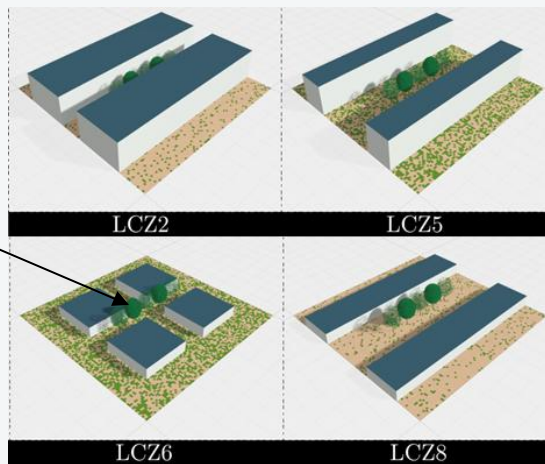


MODÉLISATION DE L'ARBRE



Volumes géométriques simples pour les couronnes (facettes foliaires) + tronc/branches cylindriques (d'après les données d'inventaire)

MODÉLISATION DE LA SCÈNE



Sol plat + nomenclature des canyons urbains Local Climate Zone (LCZ) pour les types de bâtiments et de sol + propriétés optiques des matériaux urbains (toit, mur, sol)

1) Réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les éléments de la scène contribuant le plus au signal Sentinel-2

Stratégie
d'extraction
spatiale

Représentation des pixels mixtes :

- Différents scénarios liés à la position du pixel, aux incertitudes de géoréférencement et à l'orientation
- Mélange de couronnes d'arbres, de sol, d'objets, d'ombres propres et portées, etc.



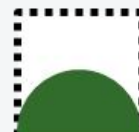
Window 1



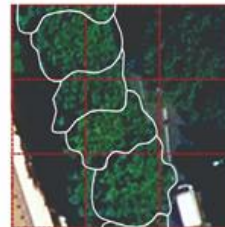
Window 2



Window 3

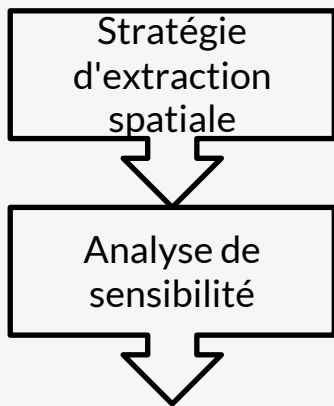


Window 4



10m
10m

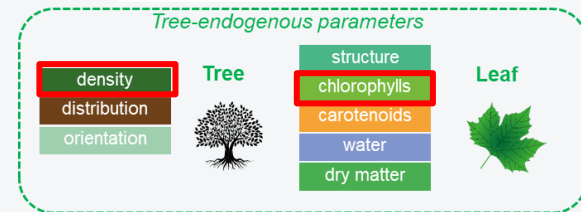
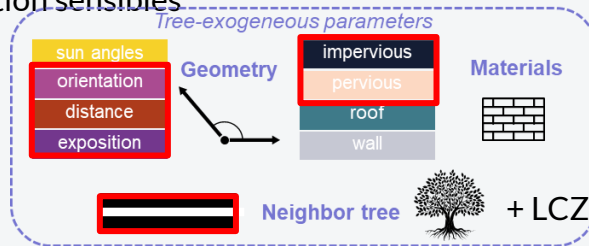
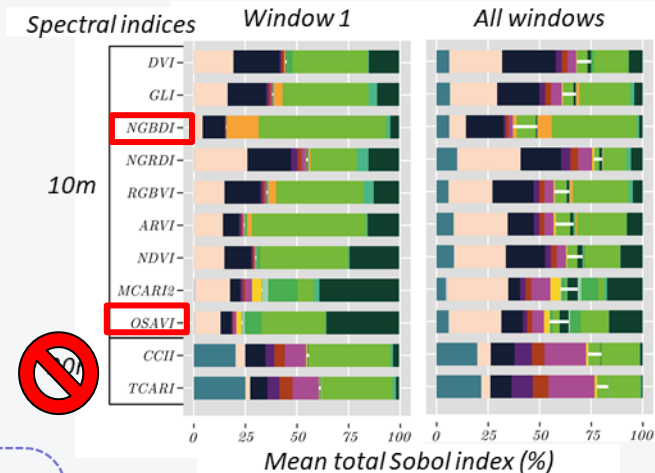
1) Réaliser une analyse de sensibilité pour identifier les éléments de la scène contribuant le plus au signal Sentinel-2



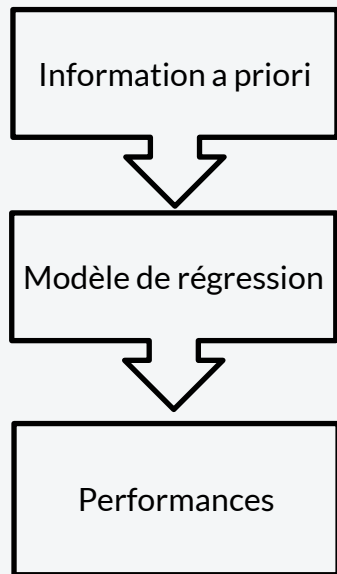
- Réalisation d'un plan d'expériences (17 paramètres variables, 8000 simulations),
- Construction de métamodèles,
- Sélection des paramètres influents sur les signaux simulés, des paramètres arbres accessibles et des indices de végétation sensibles.



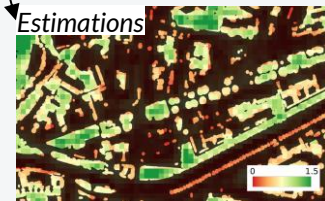
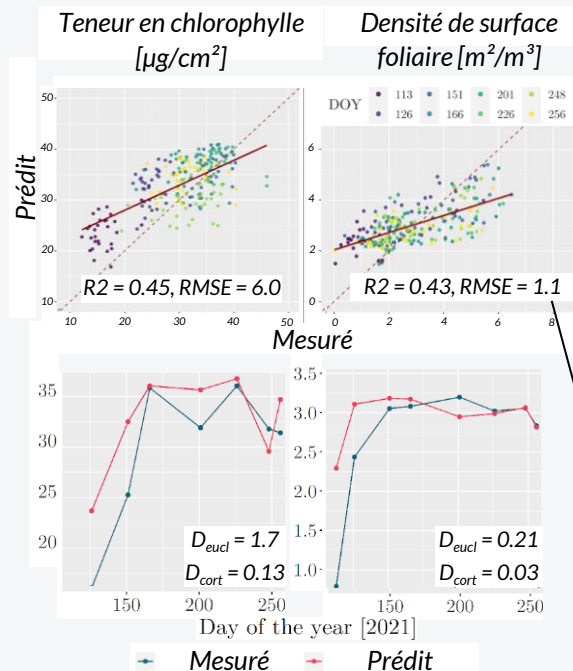
OpenTurns
(Airbus, EDF,
ONERA)



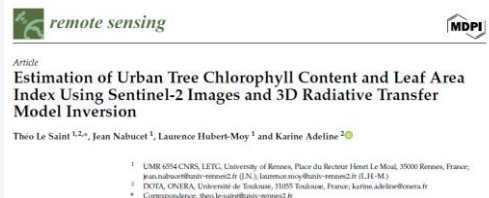
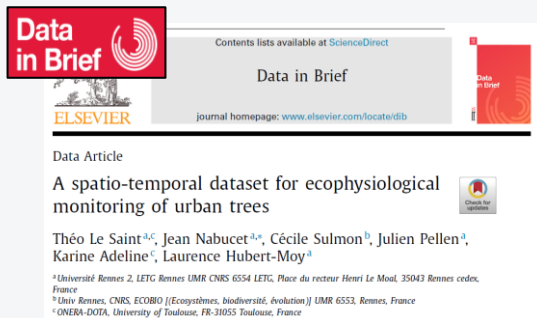
2) Développer un modèle d'inversion hybride contraint pour l'estimation des traits de végétation



- Entraînement/test de méthodes d'apprentissage automatique (RFR, GPR) basées sur une sélection de variables (paramètres contextuels + bandes spectrales + indices de végétation)
- Validation à l'échelle du pixel ou de l'arbre (pondération entre arbres ou arbre dominant)
- Cohérence multi-temporelle et spatiale



Rennes



Strasbourg

