

Journée AST Milieux Urbains le 24/10/2025

Cartographie de l'albédo à haute résolution (10 m) à partir des données Sentinel-2 pour une meilleure estimation des ICUs

*Jean-Louis Roujean (CESBIO), Bertrand Saulquin (CESBIO),
Georgios Kyriakodis (CSTB)*



- L'étude s'inscrit dans le cadre de développements permettant d'estimer plus régulièrement et plus finement des albédos urbains pour une meilleure estimation des indices de chaleurs urbains (ICU) instantanés dans le cadre du projet IMPROVE (Interactive **MaP**ping of **uR**ban **O**verh**E**ating) financé par **l'ADEME**. C'est la suite du projet SCO Sat4BDNB financé par le CNES.
- Le projet IMPROVE (2024-2026) vise à contribuer au développement de la plateforme numérique « Plus Fraîche Ma Ville », en mettant à disposition une série de cartes comprenant l'Intensité maximale des ICUs.
- Le projet IMPROVE vise également à développer des stratégies d'atténuation locales de la chaleur en ville et des zooms à haute résolution spatiale sur l'estimation de l'albédo urbain.

TOUT S'EXPLIQUE

L'EFFET D'ALBEDO

Tout corps réfléchit une partie de l'énergie solaire qu'il reçoit. L'albédo est le pourcentage entre la quantité d'énergie solaire réfléchie et la quantité d'énergie reçue. Plus un corps est clair, plus la partie réfléchie est importante : son albédo est fort. À l'inverse un corps sombre absorbe davantage les rayons du Soleil : il a un albédo faible. L'« effet d'albédo » joue un rôle sur le climat de la planète et son équilibre thermique, comme l'effet de serre ou le cycle du carbone. Il est directement impacté par les activités humaines et le réchauffement climatique.

À SAVOIR : L'albédo global de la Terre est d'environ 30%, c'est-à-dire que la Terre réfléchit 30% des rayons solaires qu'elle reçoit. Les nuages sont le premier facteur influençant cette valeur.

Le Volcanisme et la pollution atmosphérique projettent des particules atmosphériques supplémentaires dans l'atmosphère

Albédo banquise :
de 60 à 90%

Albédo océan :
de 5 à 10%

Albédo désert :
de 30 à 50%

Albédo forêt :
de 5 à 20%

Albédo neige :
de 60 à 90%

Albédo prairie :
de 18 à 25%

Albédo
terres agricoles :
de 5 à 30%

Albédo
villes-routes :
de 5 à 30%

Les processus naturels qui jouent sur l'albédo terrestre :

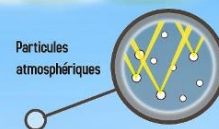
L'atmosphère et les surfaces de la Terre déterminent l'albédo global de la planète.

Les nuages et les particules atmosphériques (comme les poussières du désert ou panaches volcaniques...) empêchent les rayons solaires d'atteindre la surface de la Terre, comme un parasol : leur albédo est fort.

L'impact indirect : mécanismes de rétroaction

L'albédo est modifié par le réchauffement climatique (impact indirect).
Exemple : La Terre se réchauffe -> En Arctique, la banquise fond -> La Surface réfléchissante de la banquise diminue -> L'albédo local diminue -> La part des rayonnements réfléchis vers l'espace diminue -> La région se réchauffe encore plus -> La fonte des glaces s'amplifie -> ... C'est un effet boule de neige, ou « rétroaction positive ».

Albédo nuage :
de 40 à 90%



L'impact direct des activités humaines

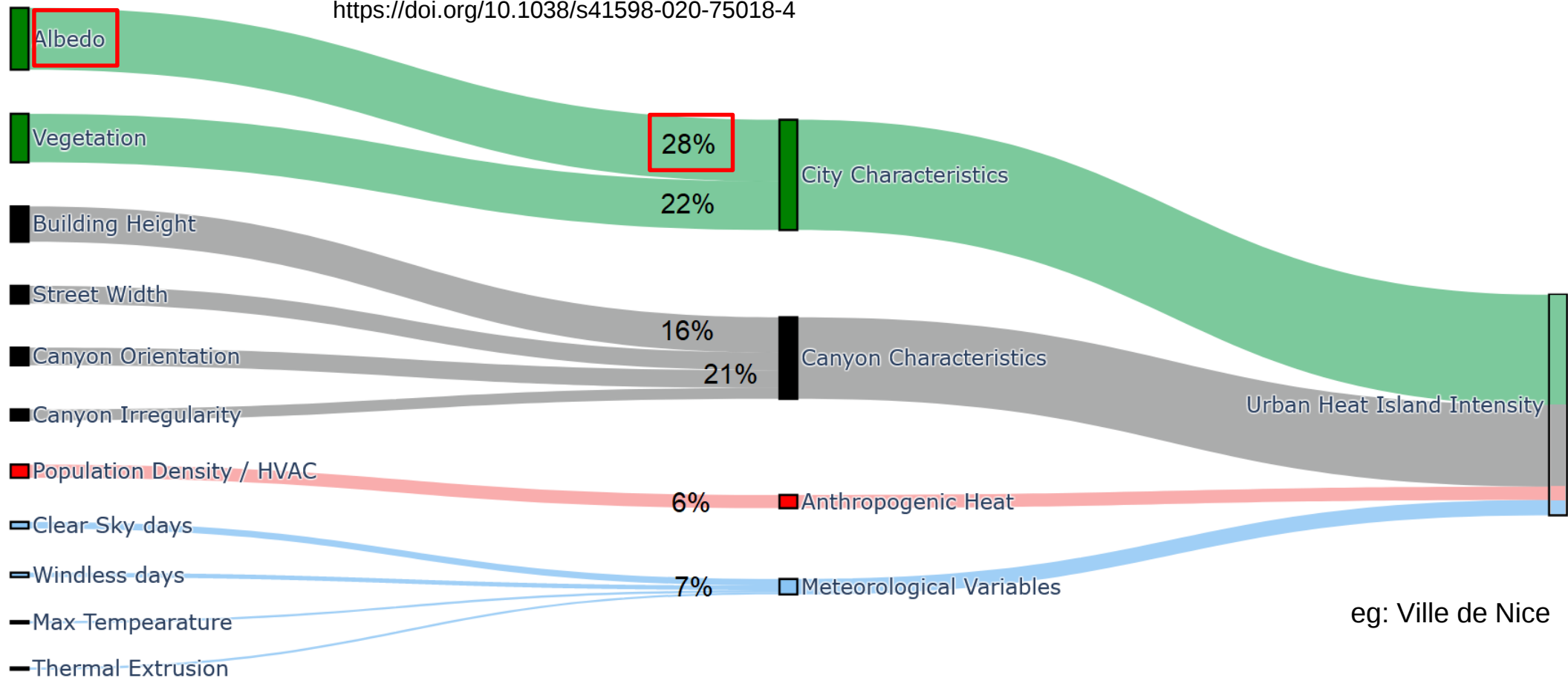
Le principal impact de l'Homme sur l'albédo terrestre se fait via le rejet de particules dans l'atmosphère (aérosols) qui amplifie la réflexion des rayons du soleil vers l'espace (effet refroidissant). Ces particules peuvent provoquer un effet inverse : en retombant sur les surfaces claires comme la neige, elles les salissent, les assombrissent, et donc diminuent leur albédo (effet réchauffant). L'aménagement des sols, notamment pour les besoins de l'agriculture (jachère, déforestation...) induit des changements des surfaces exposées, engendrant des modifications de l'albédo local.

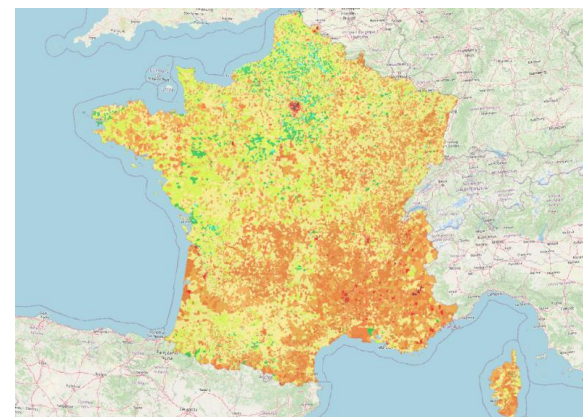
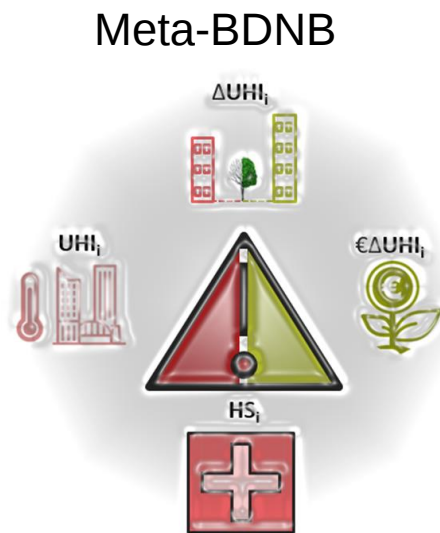
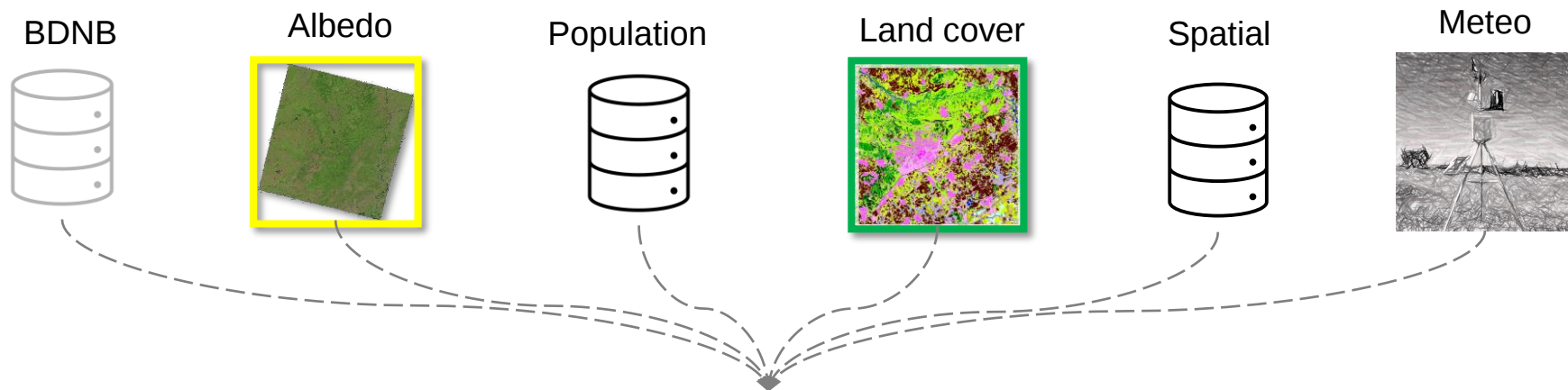
UHI Intensity

*Nature Scientific Reports

Sangiorgio, Fiorito, Santamouris, 2020

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75018-4>

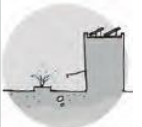




➤ De meilleures estimations de l'albédo pour de meilleures estimations d'ICUs



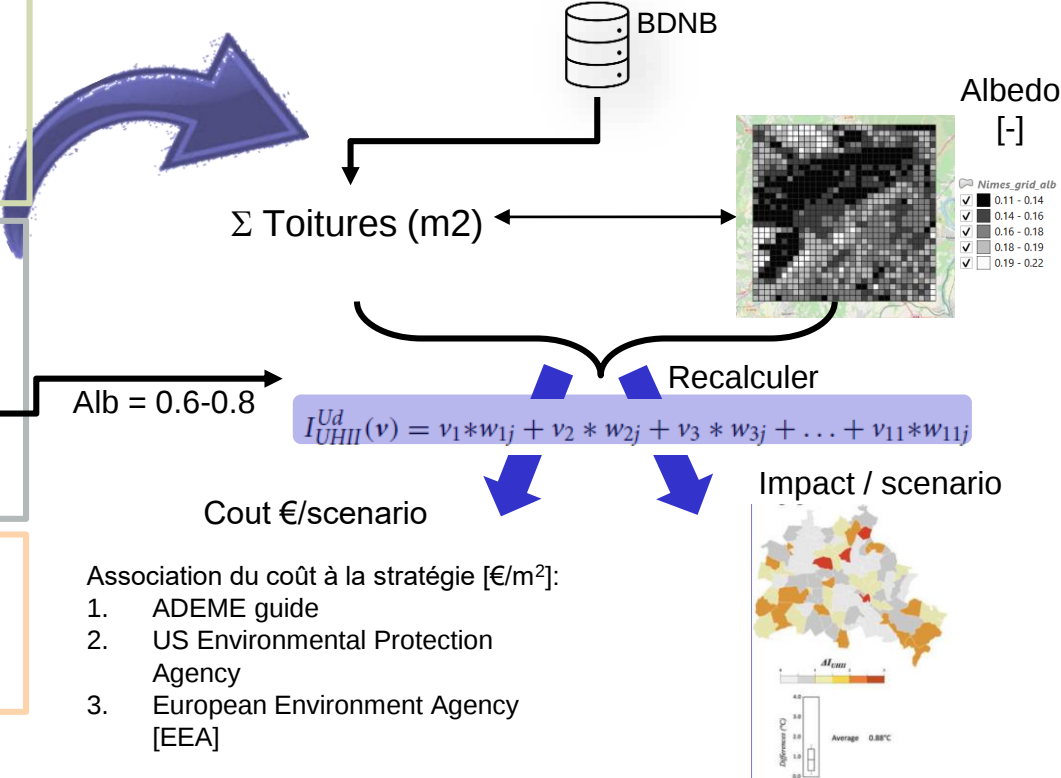
- 1. Parcs
- 2. Arbres
- 3. Pelouses, prairies
- 4. Toiture végétalisée
- 5. Façade végétalisée
- 6. Plans d'eau, rivières
- 7. Gestion des eaux pluviales



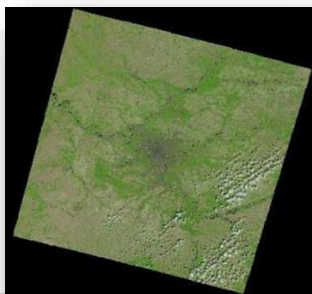
- 1. Forme urbaine bioclimatique
- 2. Fontaines, jets d'eau
- 3. Arrosage de l'espace urbain
- 4. Isolation et inertie thermique
- 5. Structures d'ombrages
- 6. **Panneaux solaires**
- 7. **Albédo élevé**
- 8. Revêtements drainants
- 9. Changement de phase



- 1. Réduction du trafic routier
- 2. Réduction de l'utilisation de la climatisation
- 3. Adaptations individuelles et sociétales aux fortes chaleurs

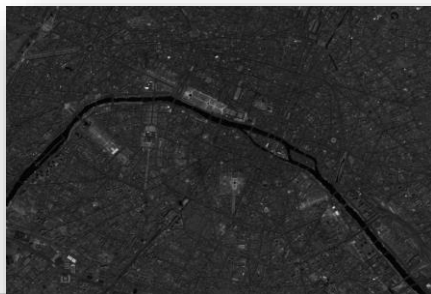


Exemple de génération de carte nationale d'albédo et d'inclusion dans le BDNB.



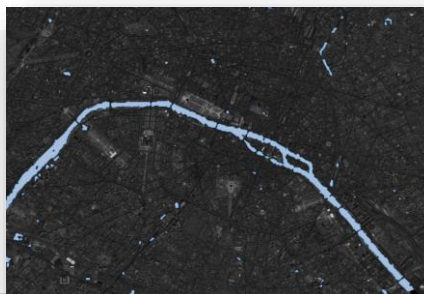
Récupération des images satellite Sentinel-2 pour toute la période estivale

- Résolution : 10m
- Période estivale pour éviter les effets saisonniers



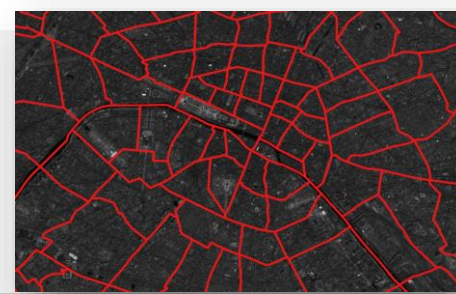
Reprojection et application d'algorithme narrow-to-broadband.

- Lambert-93 CRS



Intersection des pixels d'eau avec les données de couverture terrestre et élimination.

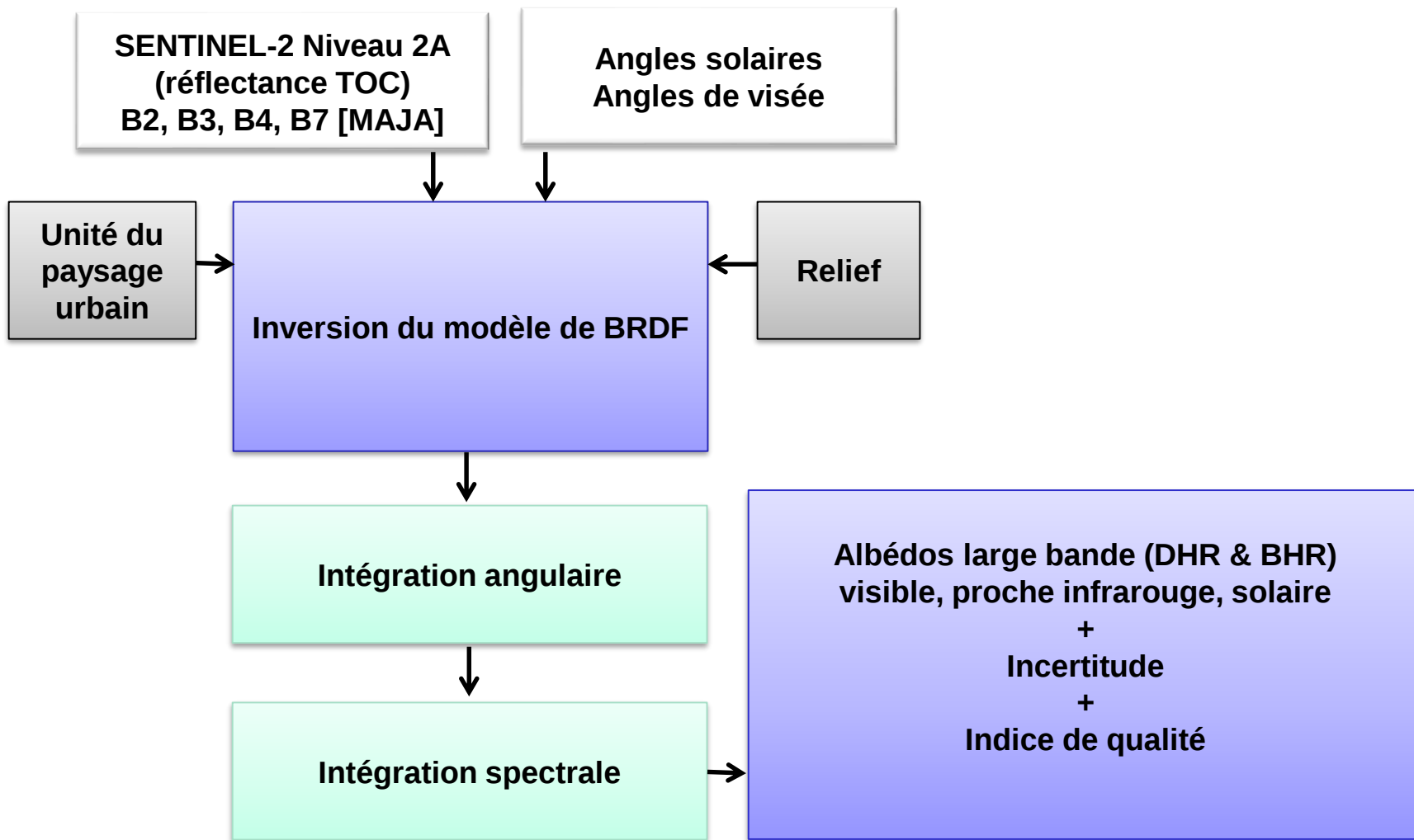
- Les pixels d'eau présentent des valeurs d'albédo très faibles



Indexation spatiale et calcul.

- Indexation spatiale : les requêtes SQL deviennent très efficaces !

Flowchart

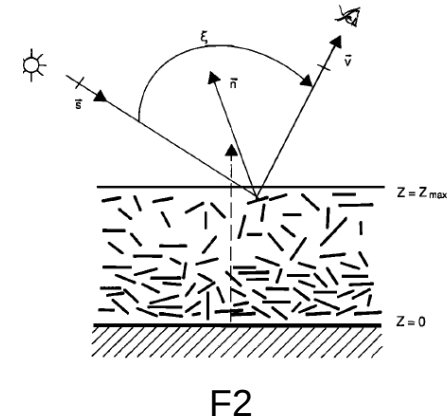
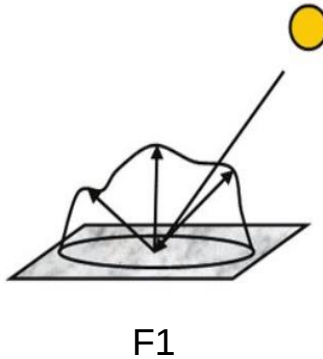
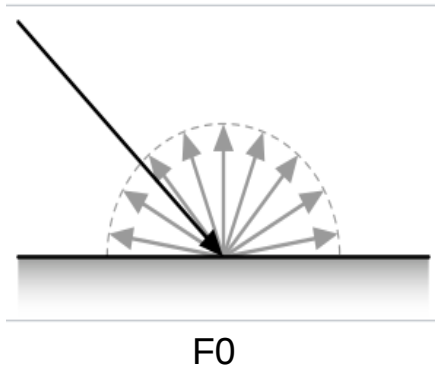




Estimation de la BRDF

$$\text{BRDF}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) \text{ (sr}^{-1}\text{)} = \sum_k F_k(\lambda) * K(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$$

- F0 modélise la contribution isotrope de la BRDF
- F1 modélise la contribution géométrique de la BRDF
- F2 modélise la contribution volumique de la BRDF engendrée par la diffusion multiple



Intégration angulaire

- La réflectance directionnelle hémisphérique (DHR en anglais) est la réflectance engendrée par une illumination directe (i.e. pas de diffusion dans l'atmosphère) intégrée dans toutes les directions de vues
- La réflectance bi-hémisphérique (BHR en anglais) correspond à la réflectance engendrée par une illumination indirecte et constante dans toutes les directions (i.e. diffusion complète) intégrée dans toutes les directions de vues
- L'albédo spectral, mesurée e.g. in-situ, est la somme pondérée par la fraction de lumière diffuse de DHR et BHR

$$a(\lambda) = [1 - f_{diff}(\lambda)]DHR(\lambda, \theta_s, \varphi_s) + f_{diff}(\lambda) * BHR(\lambda)$$

Les quantités physiques estimées à partir des L2 de S2 (MAJA)

➤ Intégration spectrale à partir de la réponse spectrale de S2

- Les **albédos bande large** sont estimés à partir du satellite:

$$DHR_{bb}(\lambda_1:\lambda_2, \theta_s, \varphi_s) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} DHR(\lambda, \theta_s, \varphi_s) E(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda}$$

$$BHR_{bb}(\lambda_1:\lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} BHR(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda}$$

$$a_{bb}(\lambda_1:\lambda_2) = \frac{Eu(\lambda_1:\lambda_2)}{Ed(\lambda_1:\lambda_2)} = [1 - f_{diff}(\lambda)] DHR_{bb}(\lambda_1:\lambda_2, \theta_s, \varphi_s) + f_{diff}(\lambda) * BHR_{bb}(\lambda_1:\lambda_2)$$

- Sont **comparés aux mesures in-situ** des albédomètres des projets Albedo-Praires et Albatre :

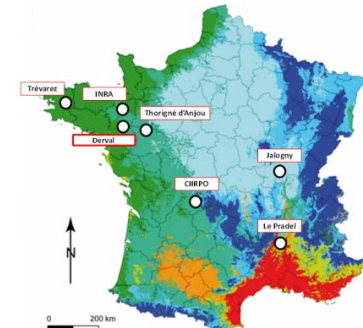
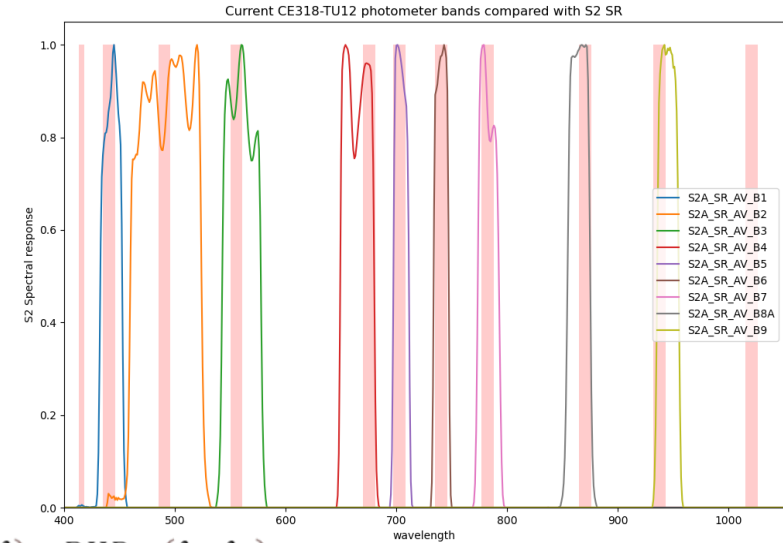


Figure 1: Map of the studied grasslands.

Réponse spectrale de S2A
vs Cimel CE318 (Radcalnet-La Crau)



- L'estimation du gain du filtre de Kalman s'effectue à partir de l'apriori (i.e. l'état précédent) et des nouvelles observations:

$$G_n = C_n^a H^T (H C_n^a H^T + R)^{-1}$$

C_n est la matrice de covariance des paramètres à estimer

H est la matrice des paramètres du modèle de BRDF

R est la matrice de covariance du modèle de BRDF i.e. les incertitudes du modèle de BRDF

- Avec une observation unique, i.e. un nouveau pixel clair observé par S2A ou B (voir C), les estimations et la matrice de covariance du modèle de BRDF sont mises à jour:

$$X_n = X_n^a + G_n (Z_n - H \cdot X_n^a)$$

$$C_n = (1 - G_n \cdot H_n) \cdot C_n^a$$

- Il est possible de filtrer des nouvelles observations aberrantes (e.g. bords de nuages mal détectés):

$$|Z - H \cdot X_n^a|^2 \leq 4 * \text{diag} (R + H \cdot C_n^a \cdot H^T)$$

- Si la nouvelle observation ne respecte pas la condition ci-dessus, on garde l'a priori en augmentant l'incertitude sur les paramètres en fonction de la date de la nouvelle observation

- ✓ L'utilisation traditionnelle des fenêtres glissantes temporelles utilisées jusqu'à présent pour l'estimation de la BRDF est imitée par une fréquence élevée de couverture nuageuse, ce qui entraîne des inconsistances et des discontinuités dans les séries temporelles d'albédo.
- ✓ **L'utilisation du filtrage de Kalman** permet une meilleure estimation et une meilleure continuité temporelle des albédos estimés.

Moyenne glissante:

- nécessite un nombre d'observations supérieur ou égal au nombre de paramètres estimés
- peut entraîner des inconsistances entre 2 estimations: pas de garantie de continuité
- la régularisation et l'apriori n'enlève pas les points précédents

Filtrage de Kalman:

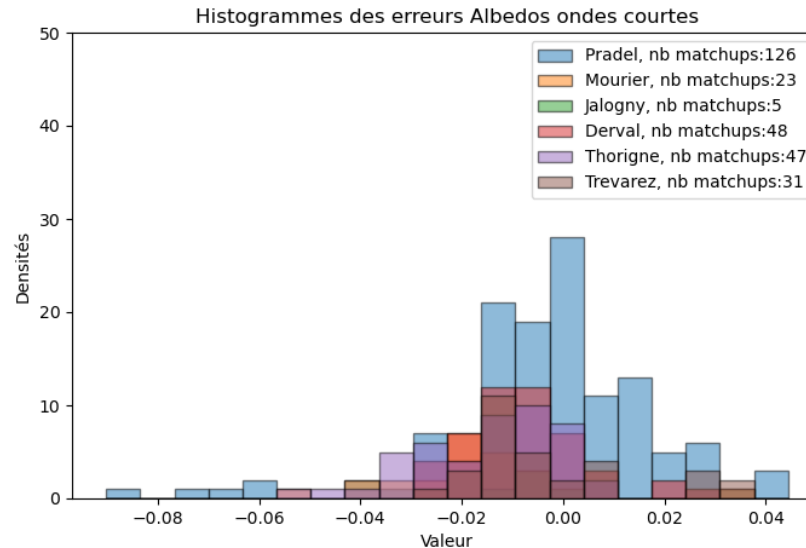
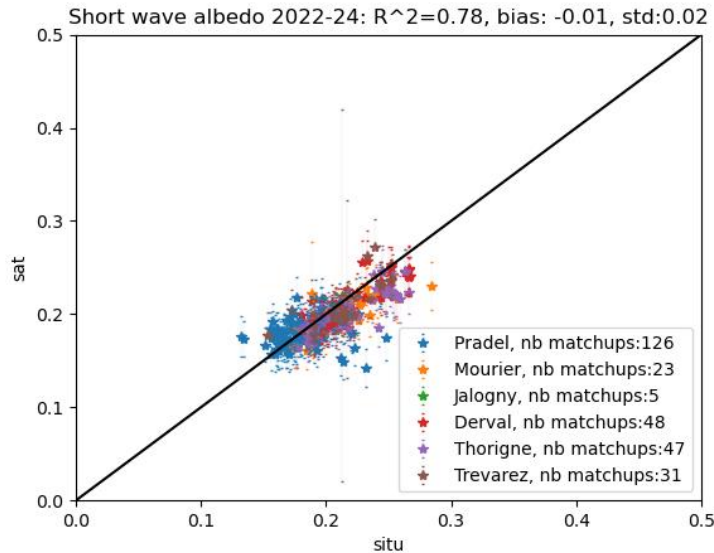
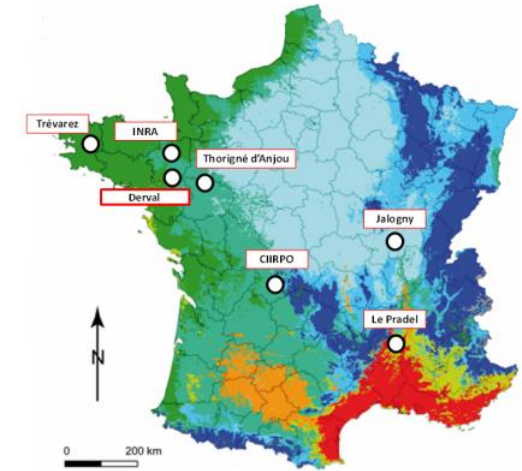
- Nécessite une bonne connaissance de l'apriori en valeur et matrice de covariance. Cet a priori peut être estimé à partir de données historiques
- Ne nécessite qu'une seule observation pour mettre à jour les estimations et l'apriori
- Permet des séries temporelles plus complètes et continues

Stations in-situ: Pradel, Mourier, Jalony, Trevarez, Thorigne, Derval (sites prairies)

➤ Régression classique [-4 images : image] pour avoir au mois 3 observations

Protocole de validation (matchups):

- Fenêtre glissante [-4 images : image]
- Pixel central
- Δt sat-situ < 30 minutes
- **Pas de filtrage**

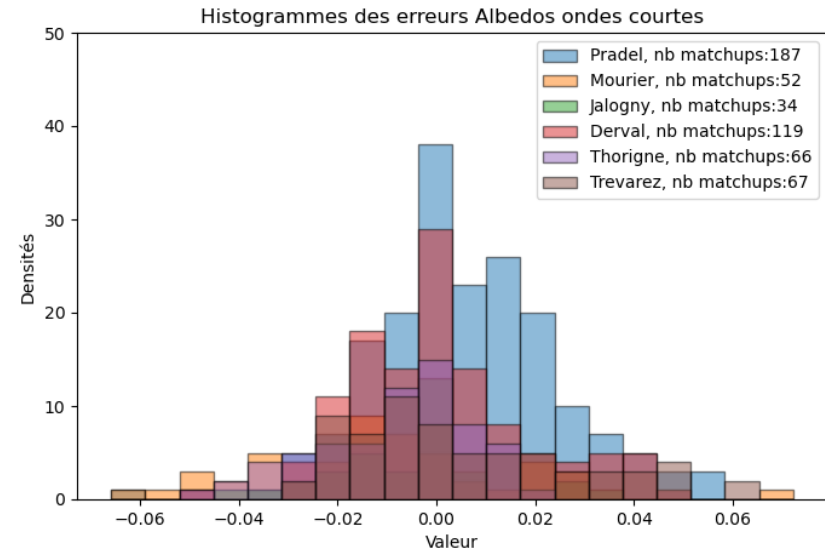
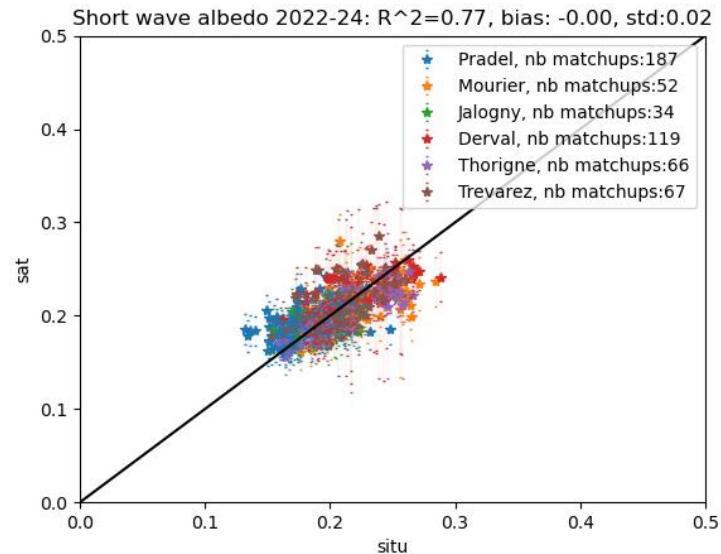


Stations in-situ: Pradel, Mourier, Jalony, Trevarez, Thorigne, Derval

- **Filtrage de Kalman [une seule image]**
- **Apriori calculé sur les 10 premières images**

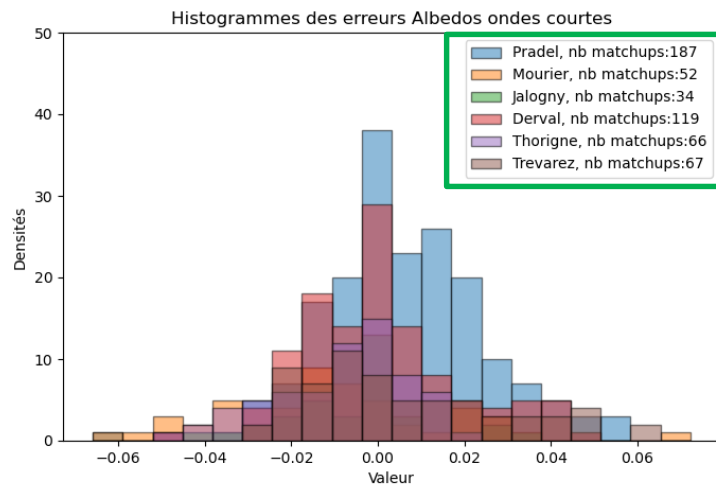
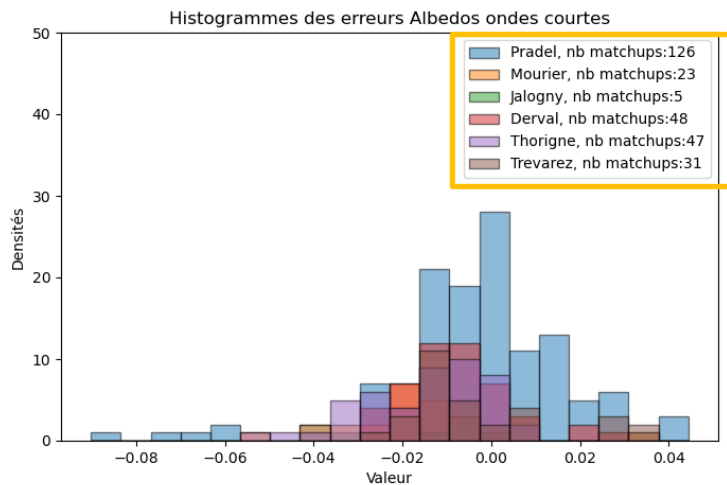
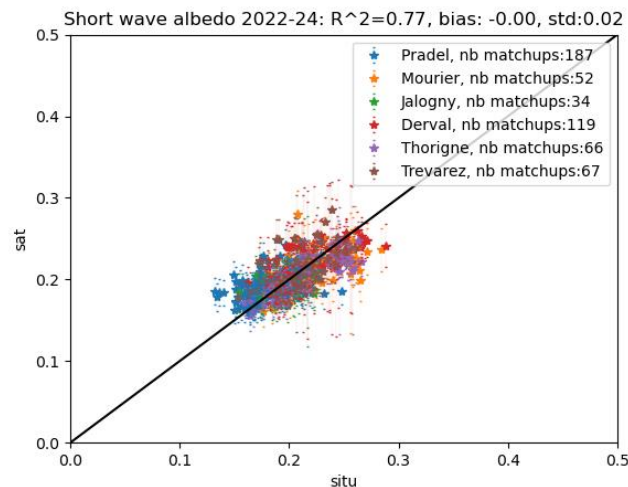
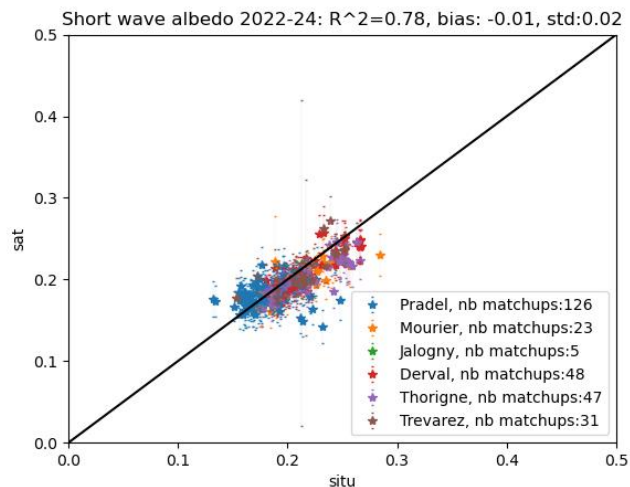
Protocol de validation (matchups):

- Fenêtre glissante [image]
- Pixel central
- Δt sat-situ < 30 minutes
- **Pas de filtrage**

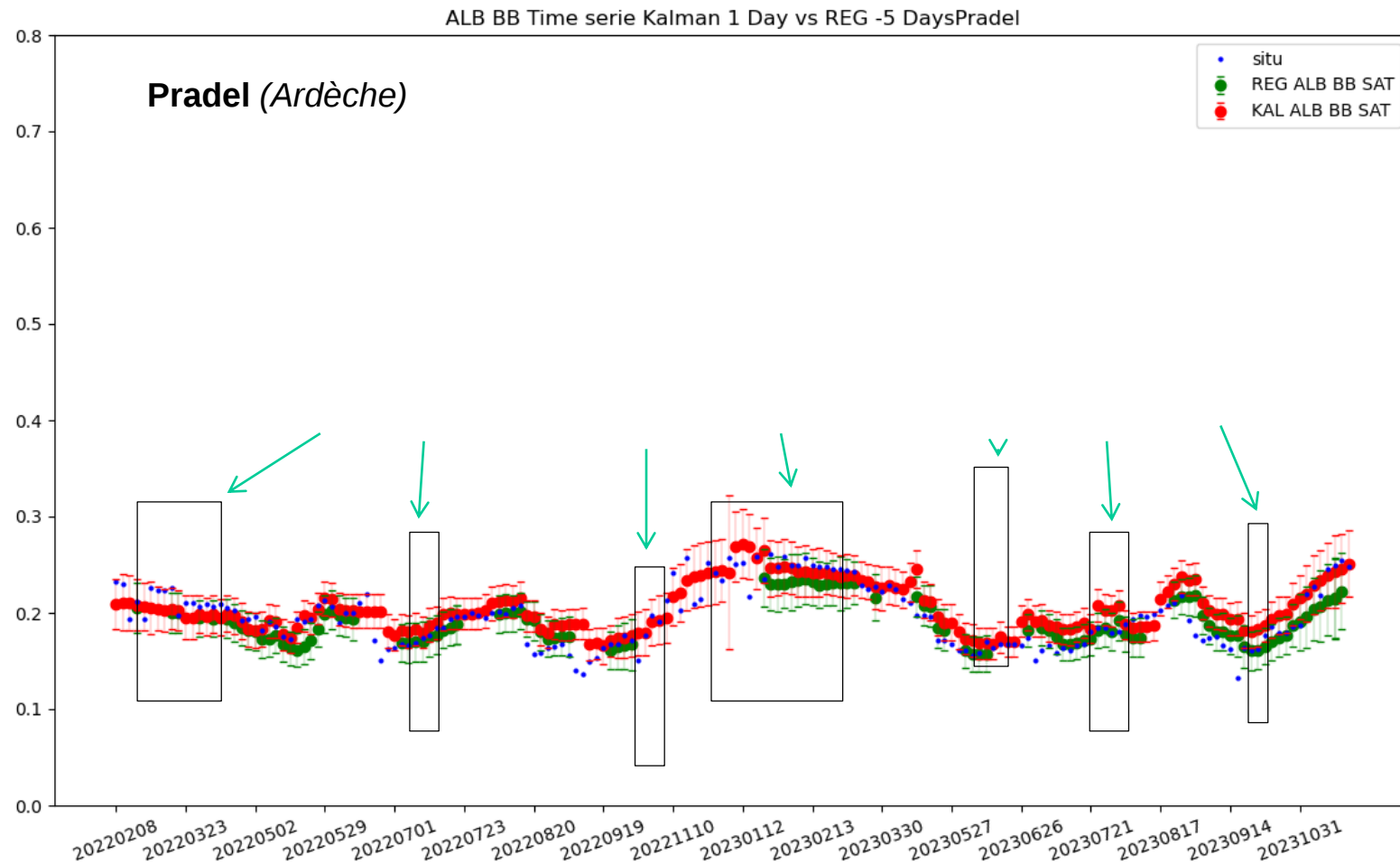


- Filtrage de Kalman [une seule image]
- Apriori calculé sur les 10 premières images

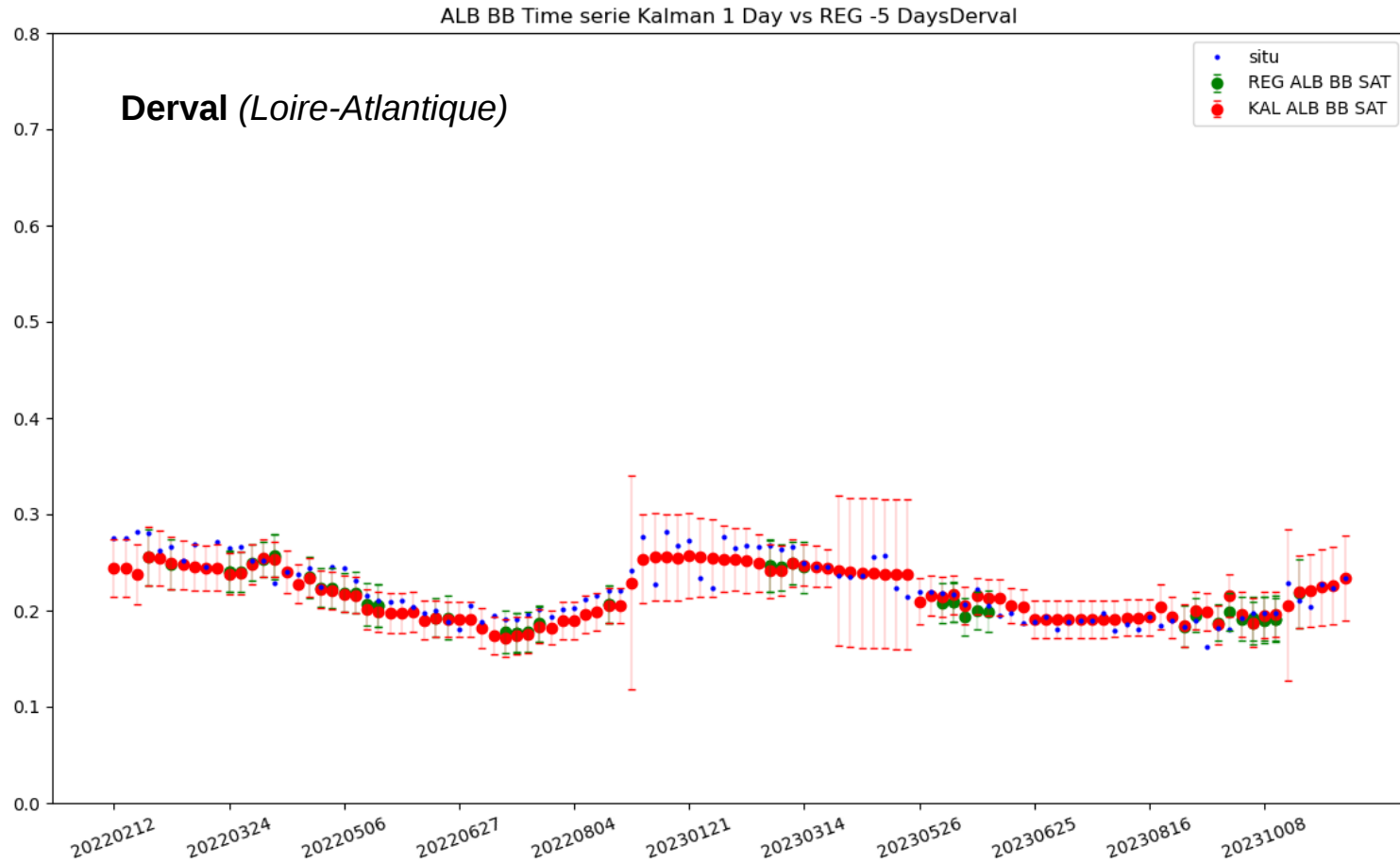
Régression classique [-4 images : image]



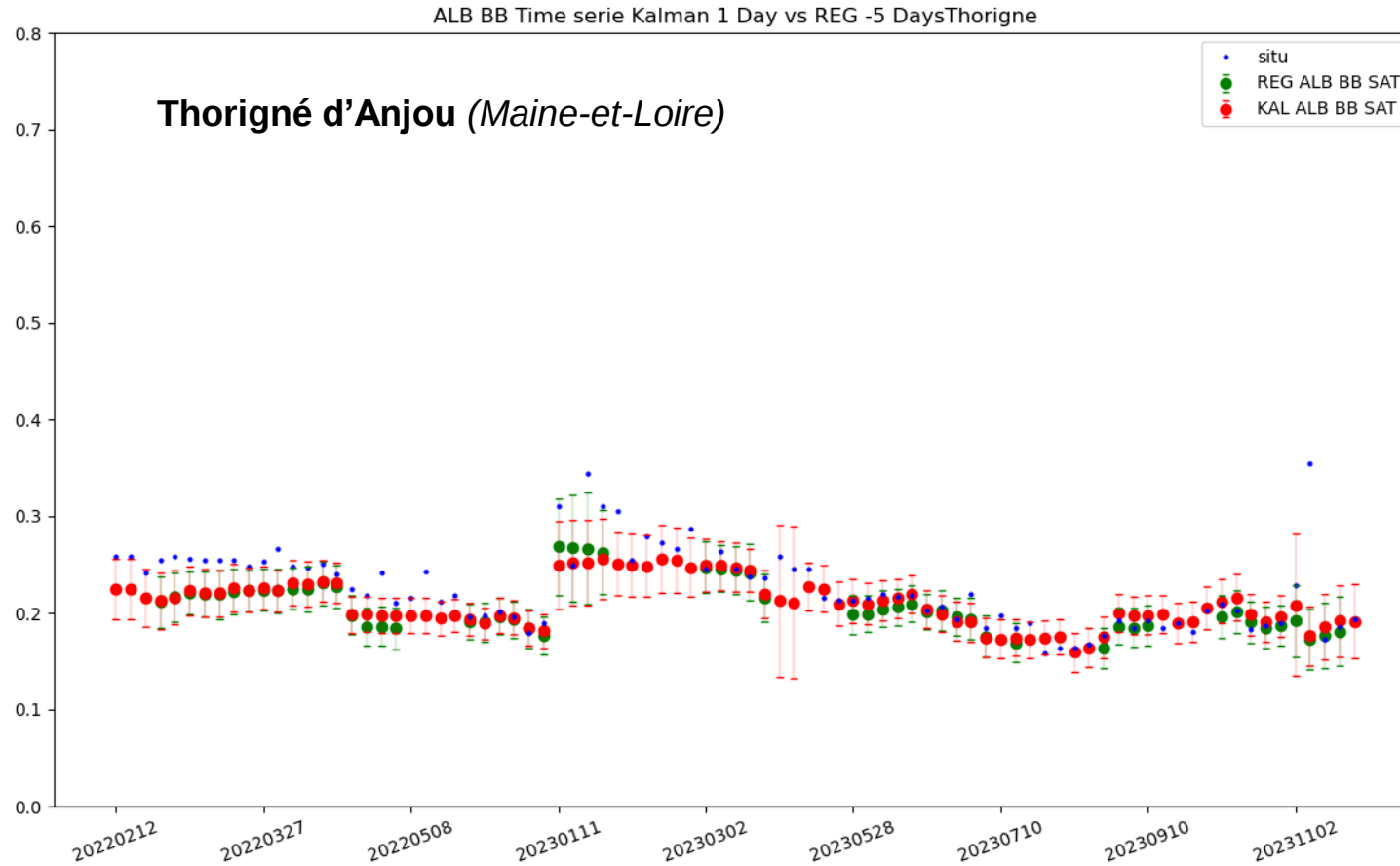
Validation des données Regression Vs Kalman



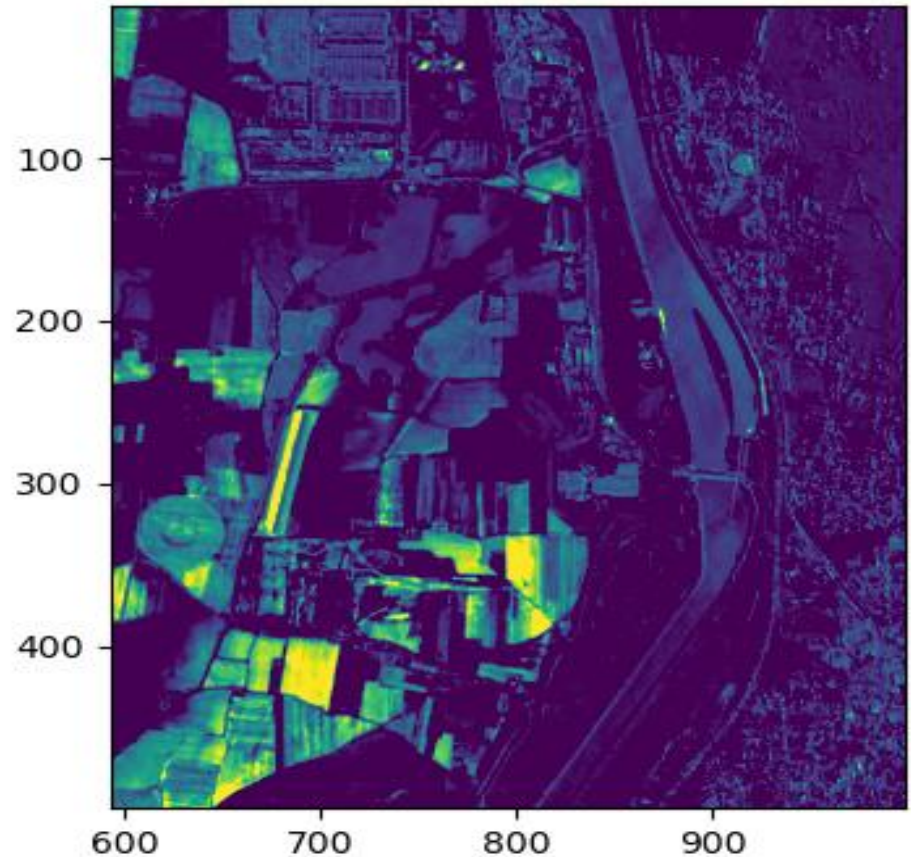
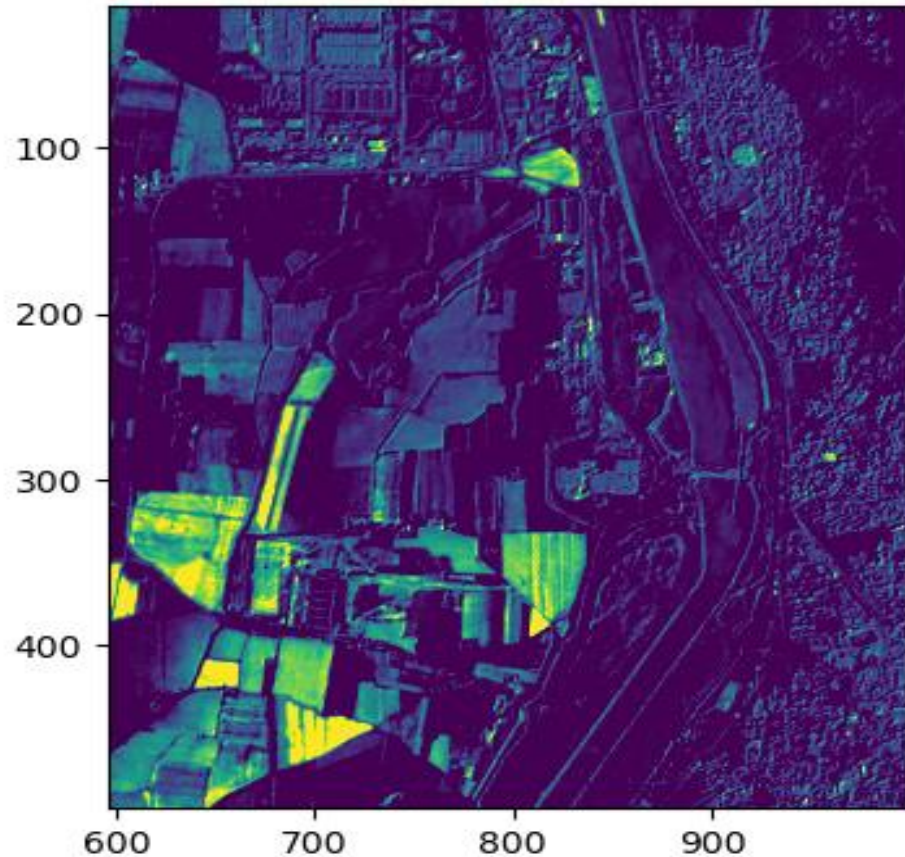
Validation des données Regression Vs Kalman

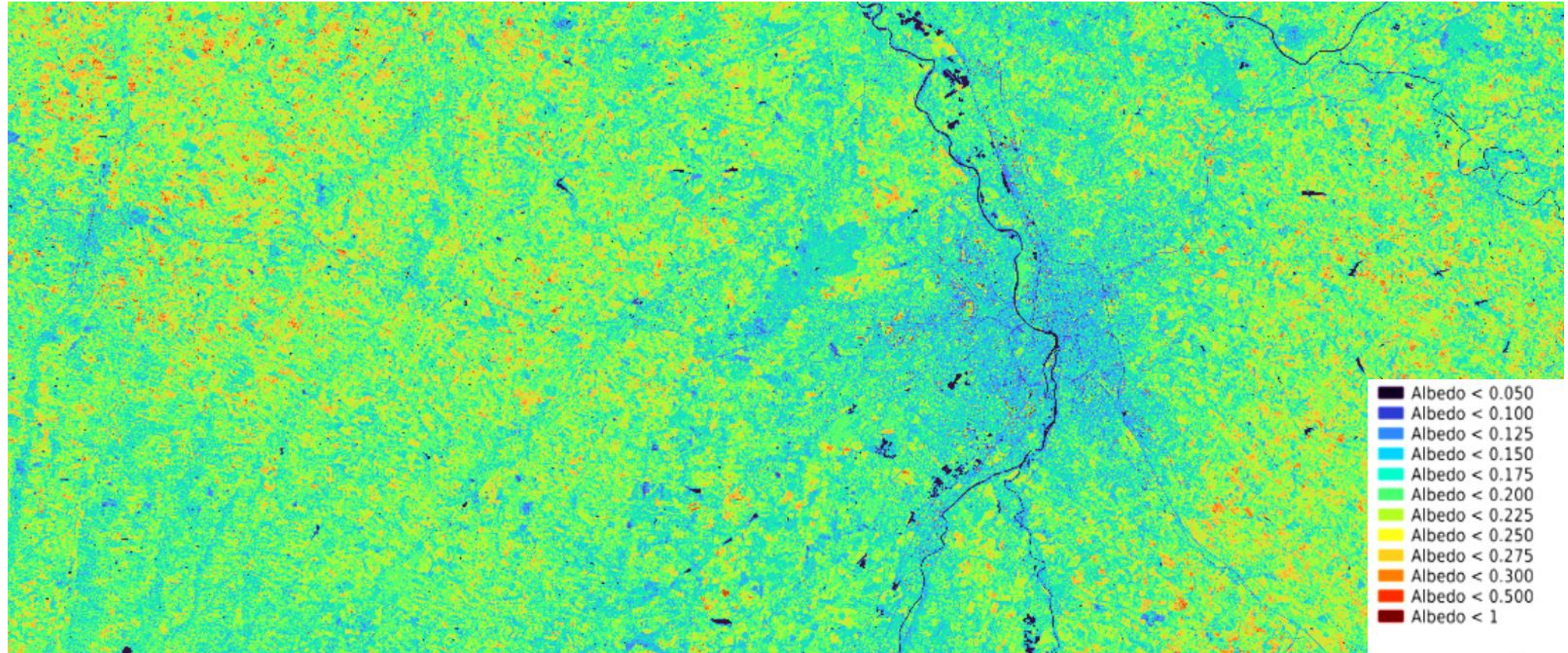


Validation des données Regression Vs Kalman

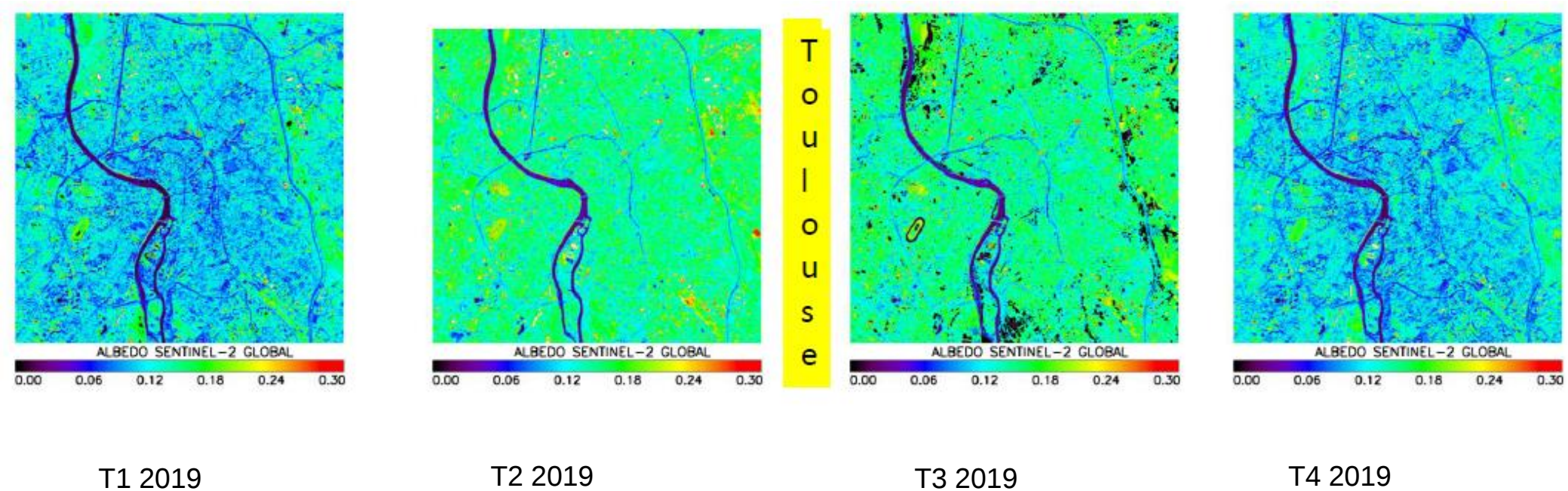


Inversion du modèle de BRDF avec rayonnement diffus (gauche) et sans (droite)





Evolution saisonnière de l'albédo pour Toulouse



Conclusions



- L'approche par filtrage de Kalman permet d'offrir une meilleure continuité des champs estimés de BRDF et d'albédos pour les utilisateurs
- La qualité des estimations n'est pas (ou peu) dégradée
- Le nombre d'estimations peut être multiplié par 2 ou 3 selon les configurations
- Les meilleures estimations des albédos seront mises à disposition du projet **IMPROVE pour les années 2024 & 2025**. Ce projet vise à estimer des ICUs à haute résolution pour l'aide à l'aménagement urbain local des villes en France
- *Remerciements: CNES (projet SCO Sat4BDNB), ADEME (projet IMPROVE)*



**Merci
pour
votre
attention
!**

