

ORENOS

Rapport de synthèse du projet

Rapport d'étude

Août 2026

Le Cerema¹, référent public en aménagement, accompagne l'État, les collectivités et les entreprises pour adapter les territoires au changement climatique.

Il joue un rôle clé dans l'élaboration et la mise en œuvre de politiques publiques nationales et de projets territoriaux adaptés au climat de demain dans 6 domaines d'activité : aménagement et stratégies territoriales, bâtiment, mobilités, infrastructures de transport, environnement et risques, mer et littoral.

Avec des équipes multidisciplinaires et 27 implantations sur les territoires de l'Hexagone et des Outre-mer, le Cerema dispose d'une approche globale pour conseiller, innover et fédérer.

www.cerema.fr

¹ Le Cerema est un établissement public relevant des ministères chargés de l'Aménagement du territoire et de la Transition écologique

ORENOS

Rapport de synthèse du projet

Commanditaire : CNES -SCO

Auteurs : Cerema – La TeleScop

Responsable du rapport

Emma BOUSQUET BORRUT – DTerOcc – OSECC

1 avenue du colonel Roche 31400 Toulouse

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V0	10/08/2026	Version envoyée au CNES
V1	04/09/2026	Corrections mineures

Références

N° d'affaire / NOVA : 24-OC-0131

Nom	Service	Rôle	Date	Visa
Emma Bousquet Borrut	Cerema DTerOcc/ DT / OSECC	Contributeur	06/08/2026	EBB
Aurélien Mure	Cerema DTerOcc/ DT / OSECC	Contributeur	10/08/2026	AM
Tom Brunelle	La TeleScop	Contributeur	10/08/2026	TB
Camille Lhenry	La TeleScop	Contributeur	10/08/2026	CL

Résumé de l'étude

En 2017, l'éclairage représentait selon l'ADEME 32% de la consommation électrique des collectivités territoriales. Les enjeux de gestion et de rénovation du parc d'éclairage public ont été largement évoqués lors des tensions sur le réseau électrique à l'hiver 2022. Ce levier d'économies d'énergie est largement actionné par les acteurs des collectivités territoriales, mais avec parfois un manque d'outils pour le faire efficacement et avec une vision globale sur un large territoire.

Le projet SCO ORENOS vise à développer des indicateurs de qualité de l'éclairage artificiel nocturne et d'impacts sur la biodiversité sur le territoire de la Haute-Savoie, à partir d'imagerie satellitaire. Cet indicateur permettra aux gestionnaires de parcs d'éclairage et plus largement aux décideurs locaux de prioriser leurs actions d'adaptation, de rénovation ou d'extinction d'éclairage, dans le but de proposer un éclairage plus sobre, mieux adapté aux usages et moins impactant pour la biodiversité. En effet, la Haute-Savoie est un département montagneux qui présente une riche diversité faunistique et floristique, mais qui subit de plus en plus de pressions liées à l'urbanisation, au développement économique et à la densification des infrastructures. Le département se place d'ailleurs au 1er rang des départements les plus dynamiques en termes de croissance démographique d'ici 2050. Ceci signifie que l'artificialisation des sols et la pression sur les écosystèmes vont continuer à augmenter, notamment en termes d'éclairage artificiel nocturne.

Le projet ORENOS s'appuie principalement sur les images nocturnes issues du satellite SDGSAT-1. Ces images sont fournies par le CBAS (International Research Center of Big Data for Sustainable Development Goals) à 10 m de résolution en bande panchromatique et 40 m de résolution pour les 3 bandes RGB. Plusieurs images sur la période 2022-2025 sont considérées et exploitées. Une méthodologie de pré-traitement des données a été développée. Puis, de ces images sont dérivés plusieurs indicateurs directs et croisés avec des sources de données auxiliaires.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Eclairage public	
Pollution lumineuse	
Rénovation	
Biodiversité	
Imagerie satellite	

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- ☒ Accès libre : document accessible au public sur internet
- ☐ Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- ☐ Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

SOMMAIRE

1	Rappel des objectifs de la prestation et de la méthodologie suivie	6
1.1	Objectifs du projet ORENOS	6
1.1.1	Données	8
1.1.2	Prétraitements des images satellitaires nocturnes SDGSAT-1.....	9
1.1.3	Production des indicateurs	9
2	Présentation des résultats.....	10
2.1	Indicateurs développés	10
2.1.1	Indicateurs de qualité de l'éclairage	10
2.1.2	Indicateurs d'impacts sur la biodiversité	15
2.2	Synthèse des performances	19
2.2.1	Prétraitements des images satellitaires nocturnes SDGSAT-1.....	19
2.2.2	Indicateurs	19
2.3	Données et produits livrés à l'acteur local (Syane) pour l'aide à la décision.....	21
3	Discussion	22
3.1	Retours utilisateurs	22
3.2	Apports du projet.....	22
3.3	Limites	22
3.3.1	Limites intrinsèques des données satellitaires	22
3.3.2	Autres limitations rencontrées dans le projet.....	23
3.4	Perspectives	23
3.5	Niveau de TRL atteint	24
3.6	Performance environnementale et sociale	24
4	Note de synthèse vulgarisée	25
5	Valorisation.....	27

1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA PRESTATION ET DE LA METHODOLOGIE SUIVIE

1.1 Objectifs du projet ORENOS

Le projet ORENOS vise à développer un outil d'aide à la décision dans la gestion de la rénovation d'un parc d'éclairage de grande ampleur. Les indicateurs construits à l'aide d'imagerie satellitaire SDGSAT-1 couvrent la qualité de l'éclairage ainsi que les impacts sur la biodiversité de celui-ci.

Afin de répondre à ces enjeux, le projet ORENOS est porté par un consortium diversifié, qui est décrit ci-dessous.

Le **CNES** assure le portage, le co-financement la valorisation du projet.

Le **Cerema** implique plusieurs équipes, avec des contributions spécifiques :

- DTer Occitanie (pôle satellite, groupe OSECC) :
 - Pilotage du projet, rédaction des livrables, valorisation et dissémination
 - Production des millésimes de radiance SDGSAT annuels assemblés
 - Production des indicateurs de qualité de l'éclairage
 - Quantification de la pression sur la biodiversité à l'aide des images SDGSAT et construction d'un indicateur
 - Exploration et validation à partir d'imagerie optique THRS diurne
 - Encadrement avec les autres partenaires un CDD de 12 mois entièrement dédié à ce projet et financé par le SCO.
- DTer Ouest (équipe de recherche Eclairage et Lumière) :
 - Modélisation simplifiée de la radiance attendue et mesures terrain
 - Production des indicateurs dérivés de la comparaison modèle/observation
 - Encadrement d'un stage sur la modélisation simplifiée de la radiance attendue et les mesures terrain
- DTer Ouest (groupe Ingénierie Ecologique) :
 - Étude des couches cartographiques existantes en lien avec la biodiversité
 - Encadrement d'un stage sur la production d'un indicateur de pression de l'éclairage sur la biodiversité.
- DTer Méditerranée (groupe Territoires), DTer Centre-Est (groupe Bâtiments) :
 - En appui d'expertise sur la biodiversité et les SDAL.

La Telescop est en charge des traitements initiaux relatifs aux images SDGSAT-1 ainsi que d'une partie des indicateurs de qualité de l'éclairage.

- Traitements géométriques et radiométriques des images SDGSAT-1
- Production des séries temporelles de radiance SDGSAT-1
- Dédution des indicateurs directs à partir des images SDGSAT-1

Le **SYANE** (syndicat des énergies et du numérique en Haute-Savoie), qui, conformément à l'article L 1321-9 du CGCT, exerce la compétence Eclairage public, aux lieu et place des collectivités adhérentes qui en font la demande en Haute-Savoie. Dans le cadre de ses missions, le SYANE accompagne les communes et les territoires dans une démarche de connaissances de leur éclairage et de réflexion pour construire une identité nocturne qui prenne en compte les enjeux énergétiques et environnementaux. En tant qu'utilisateur final intégré dans le projet, le SYANE apporte son expertise sur son éclairage

public, sa connaissance du territoire, fournit les données locales d'éclairage et oriente les décisions du projet pour que le service développé réponde au besoin utilisateur le plus fidèlement possible.

Le territoire d'étude est la Haute-Savoie, un département montagneux qui présente une riche diversité faunistique et floristique, mais qui subit de plus en plus de pressions liées à l'urbanisation, au développement économique et à la densification des infrastructures. Le département se place d'ailleurs au 1er rang des départements les plus dynamiques en termes de croissance démographique d'ici 2050. Ceci signifie que l'artificialisation des sols et la pression sur les écosystèmes vont continuer à augmenter, notamment en termes d'éclairage artificiel nocturne.

L'équipe projet est décrite dans le tableau ci-dessous :

Rôle	Nom, prénom	Société	Fonction / Qualifications
Responsable de production	Arnaud Ceyte	Cerema – Dter Occitanie	Chef du groupe Observation Satellitaire Et Changement Climatique
Chef de projet	Aurélien Mure	Cerema – Dter Occitanie	Responsable d'études observation satellitaire – Ingénieur télédétection
Cheffe de projet	Emma Bousquet	Cerema – Dter Occitanie	Responsable d'études observation satellitaire – Ingénieur télédétection
Membres de l'équipe projet	Sébastien Castets	Cerema – Dter Occitanie	Ingénieur projet ORENOS
	Florian Greffier	Cerema – Dter Ouest	Chef du groupe Eclairage et Lumière, Chercheur
	Abdou Chakour	Cerema – Dter Ouest	Stagiaire Albedo
	Jean-François Bretau	Cerema – Dter Ouest	Chef de projet biodiversité – référent TVB et faune
	Solène Nitsche	Cerema – Dter Ouest	Stagiaire Biodiversité
	Romuald Jobert	Cerema – Dter Centre Est	Chef de projet qualité technique et environnement intérieur des bâtiments
	Samuel Busson	Cerema – Dter Méditerranée	Responsable d'études biodiversité et foncier
	Bastien Nguyen	La TeleScop	Gérant
	Sarah Potin	La TeleScop	Cheffe de projet
	Tom Brunelle	La TeleScop	Géomaticien
	Vincent Delbar	La TeleScop	Géomaticien
	Camille Lhenry	La TeleScop	Ingénieure
	Anne Gizard	Syane	Cheffe du service éclairage public
	Fannie Veillot	Syane	Chargée de projet éclairage public
	Raphaël Viviant	Syane	Directeur général adjoint des services techniques
	Laurent Braconnier	Syane	Directeur Systèmes d'Information
	Maxime Cherblanc	Syane	Chargé de projets géomatiques

Le projet ORENOS vise donc à développer des indicateurs permettant d'orienter la stratégie de gestion et de rénovation d'un large parc d'éclairage à l'échelle départementale, ainsi qu'une base de connaissance nécessaire à la réduction de la pollution lumineuse. L'outil d'aide à la décision développé doit permettre aux équipes d'un acteur local de l'éclairage de cibler des zones à enjeux, si bien pour la qualité de l'éclairage public que pour la pression de l'éclairage public ou privé sur la biodiversité.

1.1.1 Données

Les données utilisées pour le projet sont synthétisées dans le tableau ci-dessous. Elles sont majoritairement issues de sources satellitaires, de terrain (base de données de l'éclairage public) ou des bases de référence de l'IGN.

Donnée	Source	Résolution	Date	Description
<i>Images SDGSAT-1</i>	CBAS	10m / 40m	2022-2025	Images satellites nocturne panchromatique et RGB ; images en infrarouge thermique
<i>Images Sentinel-2</i>	ESA	10m-20m	2022-2025	Images satellites diurnes en réflectance
<i>Images SPOT-6</i>	Airbus	1.50m-6m	2022-2025	Images satellites diurnes en réflectance
<i>Images Pléiades</i>	CNES/ Airbus	50cm-2m	2022-2025	Images satellites diurnes en réflectance
<i>BD EP</i>	SYANE	Vectoriel	09/2025	Vecteur des points d'éclairage public des communes de Haute-Savoie gérées par le SYANE
<i>BD TOPO - COMMUNE</i>	IGN	Vectoriel	2025	Base de données contenant des informations sur les emprises des communes
<i>BD TOPO – Zone d'activité et d'intérêt</i>	IGN	Vectoriel	2025	Base de données contenant des informations sur les zones d'activité et les zones d'intérêts
<i>Données foncières</i>	CEREMA	Vectoriel	2023	Description du foncier, des locaux et des différents droits de propriétés du parcellaire
<i>RGE Alti</i>	IGN	1m	2023	Modèle numérique de terrain
<i>MNS Correl</i>	IGN	50cm	2023	Modèle numérique de surface
<i>Données météo</i>	Copernicus	9km	2022-2025	Réanalyses climatiques ERA5-Land – total precipitation
<i>CoSIA</i>	IGN	20cm	2023	Occupation du sol (16 classes)
<i>CLC + Backbone</i>	Copernicus	10m	2021	Occupation du sol
<i>OSO</i>	Theia	10m	2023	Occupation du sol
<i>Zonages réglementaires et d'inventaire</i>	INPN/MNH N	Vectoriel	2020-2025	APB, ENS, Natura 2000...
<i>Vigie-Chiro</i>	MNHN	5km	2025	Données de présence d'espèces de chiroptères
<i>Données OSM</i>	OpenStreet Map	Vectoriel	2025	Base de données libre décrivant le territoire (lieux de culte, bâtiment historique, parkings, etc.)

1.1.2 Prétraitements des images satellitaires nocturnes SDGSAT-1

Une chaîne complète de prétraitement des images satellitaires SDGSAT-1 a été développée, sur 8 images du département acquises entre 2022 et 2025.

Tout d'abord, la qualité du **recalage géométrique** des données a été améliorée. Les données d'entrée présentent des erreurs de recalage pouvant aller jusqu'à 6 pixels (60 m), qu'il est nécessaire de corriger. Pour cela, deux méthodes ont été considérées :

- Le recalage d'une image de référence avec le code Night-OSM-Registration (adaptation d'un code du CNES) : recalages des images sur des vecteurs issus d'OpenStreetMap correspondant au réseau routier.
- Le recalage relatif des autres images sur cette image de référence avec la méthode AROSICS : calcul de corrélation entre les deux images dans le domaine de Fourier, menant à une grille de décalage ensuite appliquée à l'image d'entrée.

Puis, une étude paramétrique a permis de définir la meilleure méthode possible pour le **pansharpening** entre les bandes PAN et RGB.

Le **débruitage** des images nocturnes a également été adressé. Deux méthodes ont été développées :

- Seuillage des pixels donc la radiance est inférieure à un certain seuil.
- Suppression de taches lumineuses isolées dont la radiance est inférieure à un certain seuil et dont la taille est inférieure à un certain seuil.

La seconde méthode a été retenue car fournissant de meilleurs résultats.

Le **masquage des nuages** sur les images nocturnes a également été adressé. Il se base sur des acquisitions quasi-simultanées en bande infrarouge thermique par un capteur dédié du satellite SDGSAT-1. Ces acquisitions permettent de localiser visuellement les nuages, puis de les masquer à la main. Une méthode de détection automatique des nuages n'a pas été développée dans le cadre du projet.

Un filtrage des **zones mouillées** suite à des précipitations a également été effectué, grâce à des données météorologiques d'ERA5-Land. En effet, les revêtements (chaussées) mouillés peuvent impliquer une forte réflexion des éclairages.

Un tri des pixels présentant de la **neige** a aussi été testé (également pour s'affranchir de la forte réflexion des éclairages sur la neige), mais n'a finalement pas été conservé car menant à la suppression d'un trop grand nombre de points lumineux.

La **correction atmosphérique** des images SDGSAT-1 n'est pas fournie par le producteur de la donnée. Une méthode publiée a été testée mais non validée, et n'a pas été conservée pour le projet.

Enfin, des **millésimes annuels** (composites par moyenne ou maximum) ont été calculés pour deux années de référence, 2023 et 2025.

1.1.3 Production des indicateurs

De nombreux indicateurs ont été développés :

- Indicateurs de qualité de l'éclairage :
 - o **Indicateurs directement issus de SDGSAT-1** : ne nécessitent que des traitements sur les images, et parfois des données exogènes open source (nationales ou internationales).
 - o **Indicateurs issus du croisement avec des données locales** : nécessitent la base de données d'éclairage du SYANE ou des fichiers fonciers par exemple. Ils sont répliquables dans les territoires où une base de données d'éclairage est disponible et lorsqu'un ayant droit des fichiers foncier est impliqué.
 - o **Indicateurs issus de la comparaison SDGSAT-1 avec la modélisation de la lumière attendue depuis le ciel** : indicateurs finalement non développés.
- **Indicateurs d'impacts sur la biodiversité**

Le développement de certains indicateurs a révélé des faiblesses, un manque de fiabilité, ou une inadéquation avec le besoin, menant à leur mise de côté et à leur suppression des indicateurs effectivement fournis au SYANE. Le tableau ci-dessous résume les indicateurs explorés et les indicateurs livrés. Tous ces indicateurs sont décrits dans la Section 2.

Famille d'indicateurs	Nom de l'indicateur	Exploré/livré
Qualité de l'éclairage	Radiance moyenne par maille	Livré
	Variation saisonnière de la radiance	Exploré
	Eclairage public/privé	Livré (simplifié)
	Plus gros contributeurs	Livré
	Mauvaise orientation suspectée	Exploré
	Type de lampe	Exploré
	Eclairage potentiellement masqué/dysfonctionnel	Livré
	Cartographie de l'albédo	Livré
	Lumière attendue depuis le ciel	Exploré
Impacts sur la biodiversité	Occupation du sol	Livré
	Zones règlementaires et d'inventaires	Livré
	Continuités écologiques	Livré
	Espèces	Livré

2 PRESENTATION DES RESULTATS

2.1 Indicateurs développés

Seuls les indicateurs livrés sont décrits ici. Les indicateurs explorés mais non finalisés sont décrits dans la section suivante (synthèse des performances).

2.1.1 Indicateurs de qualité de l'éclairage

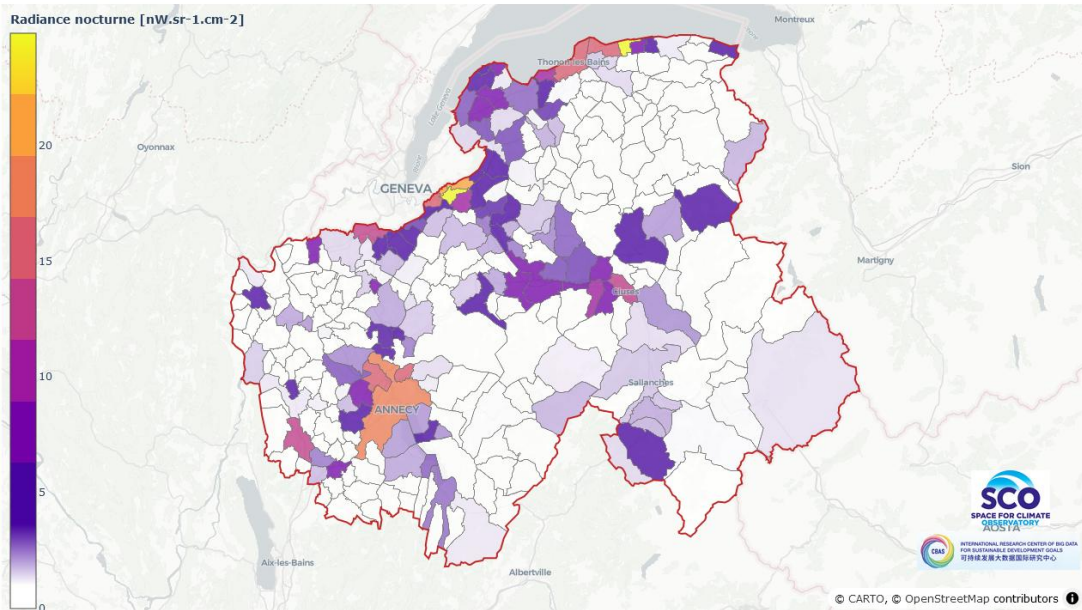
2.1.1.1 Radiance moyenne

La radiance moyenne directement calculée à partir des images nocturnes SDGSAT-1 a été livrée à la maille communale, et à la maille hexagonale. Les résultats sont fournis à la fois en couches vectorielles et en fichiers html de visualisation, pour les composites annuels 2023 et 2025.

Des séries temporelles à la commune pour les 8 dates individuelles analysées sont également fournies.

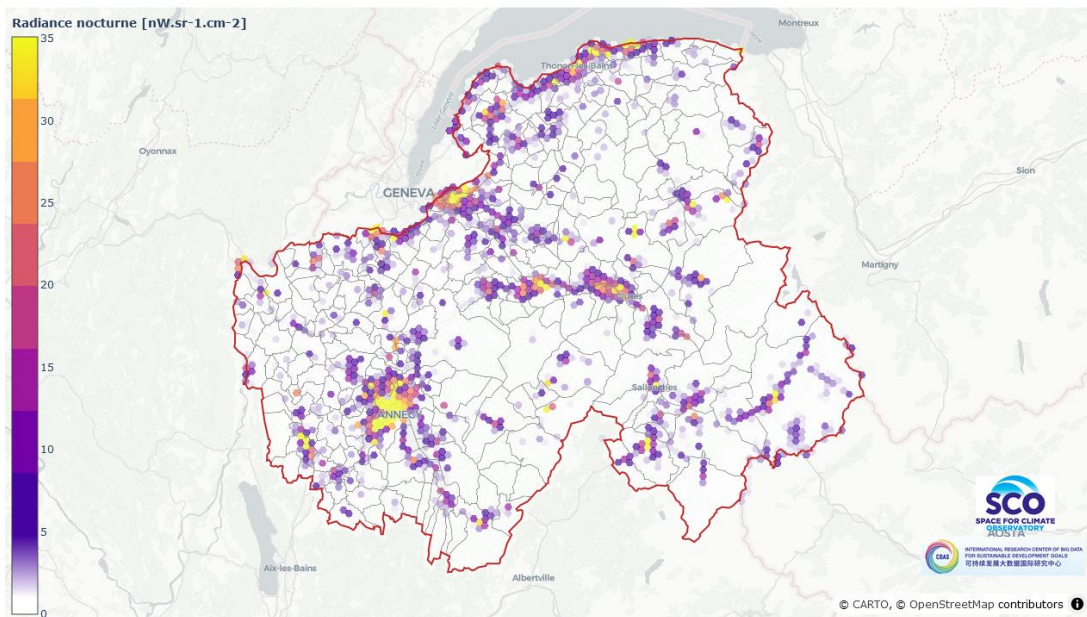
Statistiques de radiance nocturne moyenne en Haute-Savoie Comparaison 2023 / 2025

Maille communale - 2023 Maille communale - 2025 Maille hexagonale (1km) - 2023 Maille hexagonale (1km) - 2025

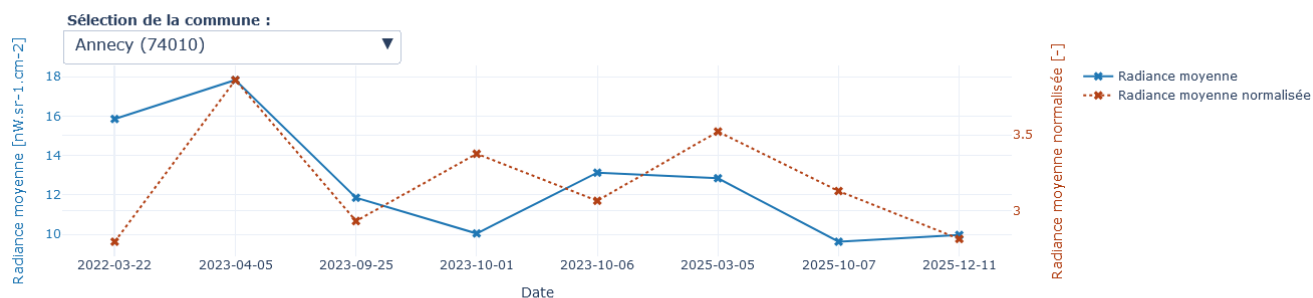


Statistiques de radiance nocturne moyenne en Haute-Savoie Comparaison 2023 / 2025

Maille communale - 2023 Maille communale - 2025 Maille hexagonale (1km) - 2023 Maille hexagonale (1km) - 2025



Annecy (74010) - Radiance moyenne globale : 12.65 $nW.sr^{-1}.cm^{-2}$



Note de lecture :

La courbe bleue (radiance moyenne) est calculée directement à partir de la donnée initiale de radiance.

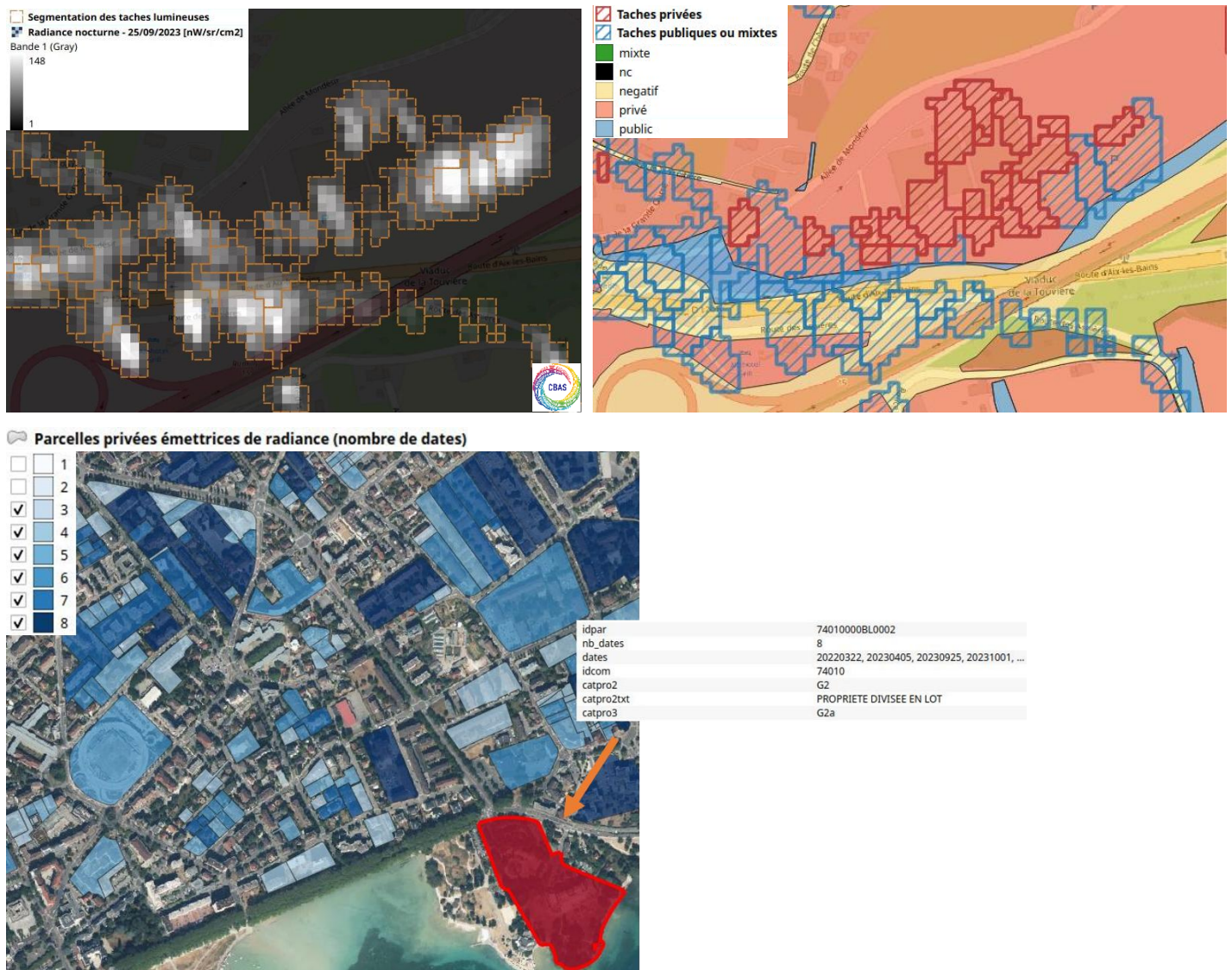
La courbe en pointillés (radiance normalisée) est calculée par comparaison avec la radiance moyenne des autres communes.

Une valeur **positive** indique que la commune émet en moyenne plus de radiance que la majorité des autres communes, une valeur **négative** indique qu'elle en émet moins.

Par exemple, la commune de Chênex (74069) présente une diminution de sa radiance moyenne sur ses 3 dernières dates mais une augmentation de sa radiance moyenne normalisée. Cela signifie que bien que son niveau de radiance ait diminué en valeur absolue, il a moins diminué que celui observé en moyenne dans les autres communes.

2.1.1.2 Discrimination de la radiance émise depuis des parcelles privées ou publiques

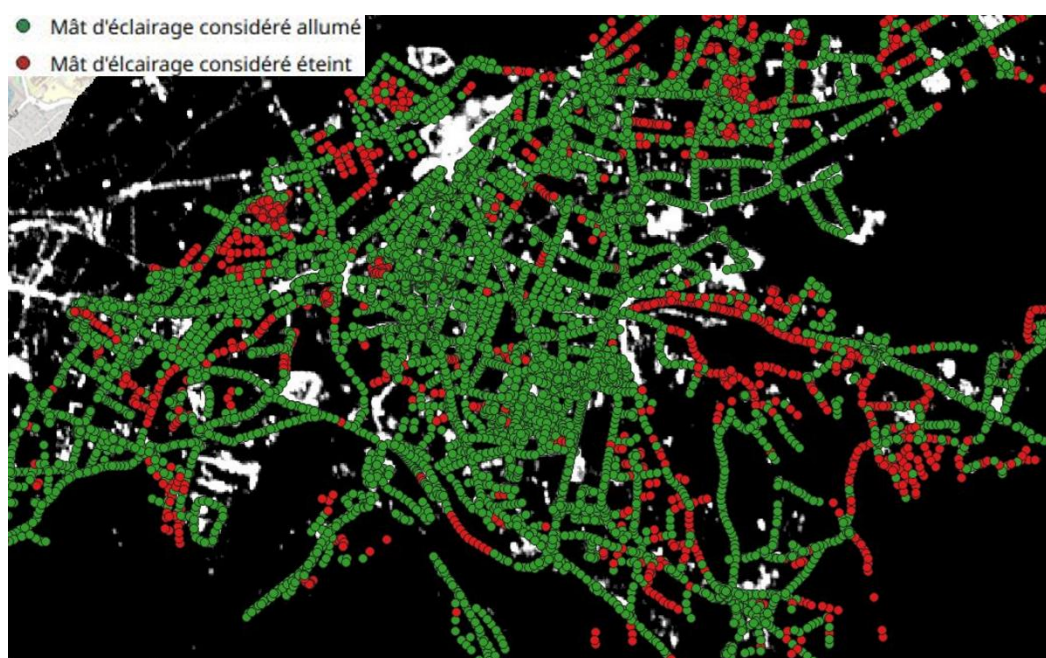
Uniquement les parcelles dont l'éclairage est très probablement issu d'une contribution privée sont identifiées, en segmentant des tâches lumineuses autour des pics de radiance, et en conservant uniquement les tâches localisées sur des parcelles privées. Les fichiers fonciers sont utilisés pour cela et classifiés en public / privé / mixte / inconnu. L'indicateur est calculé sur plusieurs dates et la couche livrée est le nombre d'occurrences d'allumage de la parcelle (8 maximum ici étant donné le nombre d'acquisitions SDGSAT-1 considérées).



2.1.1.3 Eclairage potentiellement masqué ou dysfonctionnel

Selon les données du SYANE, il existe près de 110 000 points d'éclairage public sur les communes de Haute-Savoie rattachées au syndicat d'énergie. Une partie non négligeable peut se révéler dysfonctionnelle, éteinte, ou masquée par de la végétation ou des bâtiments par exemple. A partir de la base de données d'éclairage public, un recensement des points lumineux ne présentant pas de radiance sur l'imagerie satellitaire a été réalisé. A l'aide de modèles numériques de hauteur, les éclairages potentiellement masqués par la végétation ou par des bâtiments à cause de l'angle de visée du satellite ont été écartés, pour conserver une cartographie des éclairages potentiellement éteints. Un travail sur plusieurs dates a été effectué pour cibler les éclairages non masqués et toujours vus comme éteints depuis le satellite. Ceci permet de s'affranchir d'une moindre qualité de recalage géométrique sur une seule date. Le nombre d'éclairage potentiellement éteint est supérieur à celui attendu par le SYANE. Sont en cause le possible flickering de certaines technologies ou la sensibilité trop faible du capteur pour des éclairages très sobres. Le SYANE continuera les investigations à partir

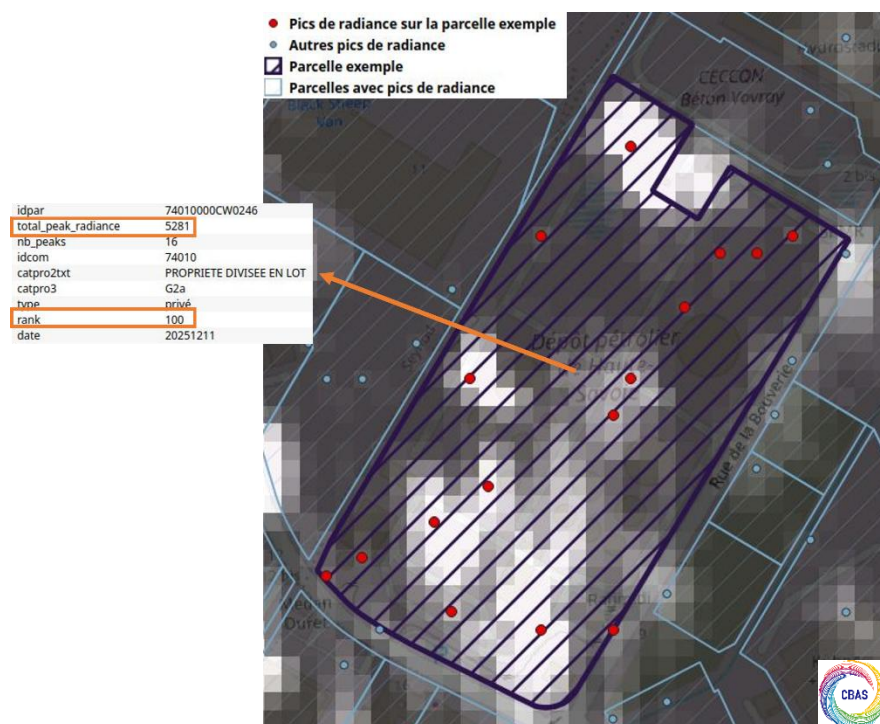
des productions d'ORENOS après le projet et une poursuite du retour d'expérience pour les équipes de développement du Cerema est prévue.



2.1.1.4 *Référencement des principaux contributeurs à la pollution lumineuse sur le département*

L'objectif de cet indicateur est de référencer les principaux contributeurs à la pollution lumineuse sur le département de Haute-Savoie, à partir de l'analyse des pics de radiance des images SDGSAT-1 et des données foncières.

Une extraction des maxima locaux sur les images SDGSAT-1 permet d'obtenir les pics de radiance sur chaque prise de vue. Ces pics sont affectés à des parcelles et les plus contributrices sont hiérarchisées en fonction de l'importance du pic, du nombre de pics sur la parcelle et de la récurrence de ces pics sur plusieurs années.



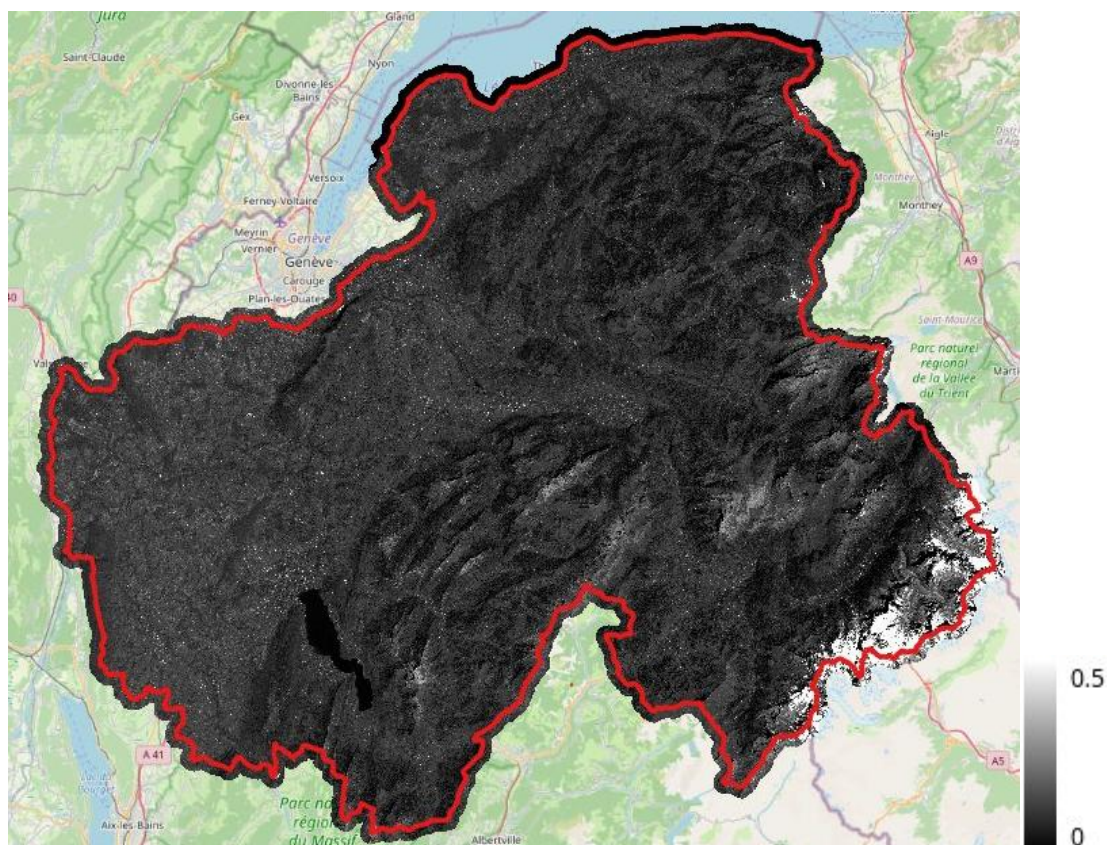
Cet outil permet efficacement de réaliser un travail de diagnostic des plus gros contributeurs à la pollution lumineuse, public ou privée hors des voiries. Le SYANE le mobilisera pour accompagner les communes dans leurs discussions avec les acteurs privés.

2.1.1.5 Cartographie de l'albédo

Un des objectifs du projet était de dériver une cartographie d'albédo solaire à partir d'imagerie satellitaire diurne. Cette cartographie avait pour objectif d'étudier et de quantifier la réflexion de l'éclairage sur les revêtements, afin de modéliser l'éclairage attendu depuis le ciel.

Pour cela, plusieurs données satellitaires diurnes ont été considérées : Sentinel-2, SPOT-6 et Pléiades, avec et sans pansharpening. Une correction atmosphérique a été appliquée aux données livrées sans correction. Une combinaison de bandes a été calculée à partir de la réponse spectrale de ces 3 capteurs. Puis, des mesures terrain d'albédo ont été réalisées et comparées à ces combinaisons de bandes satellitaires, et la relation de passage obtenue a été ajoutée au calcul de l'albédo satellitaire.

Les résultats obtenus ont mené au choix de l'imagerie satellitaire diurne SPOT-6 à 1.5 m de résolution après pansharpening pour la production de la cartographie départementale. 5 dalles de la couverture nationale SPOT-6 datant de 2025 ont été considérées pour couvrir l'intégralité du département de la Haute-Savoie.

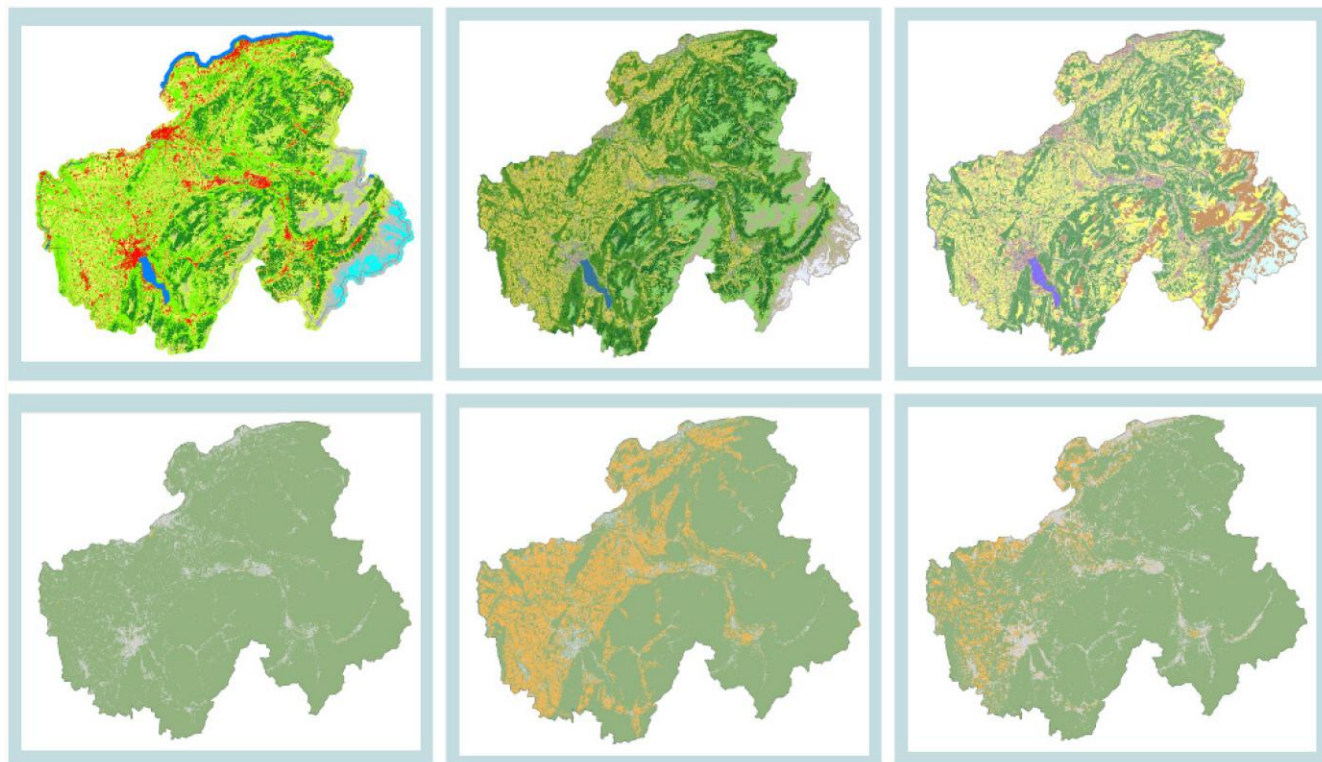


2.1.2 Indicateurs d'impacts sur la biodiversité

Pour mesurer l'impact de l'éclairage artificiel nocturne sur la biodiversité, quatre familles d'indicateurs ont été produites à l'aide des sources de données suivantes :

1) Occupation du sol

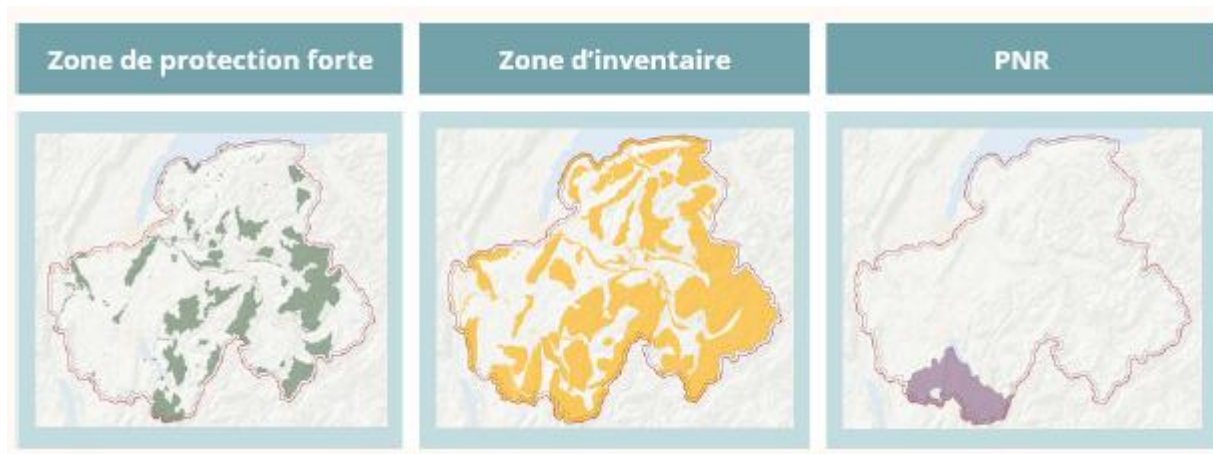
Trois sources d'occupation du sol ont été utilisées pour classifier l'impact potentiel de la lumière sur la biodiversité (de gauche à droite : CLCplus Backbone, CoSIA, OCS DDT74) :



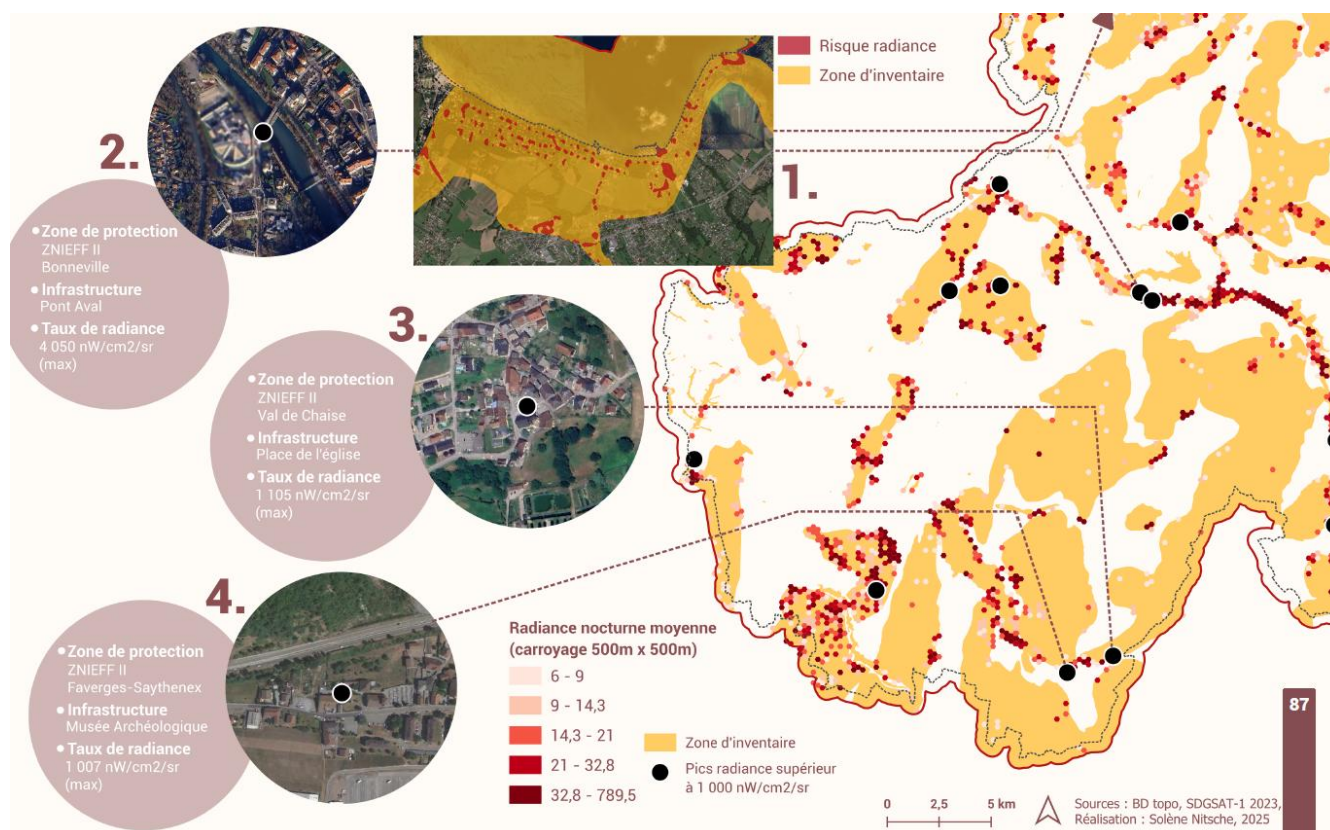
Les données CoSIA se sont avérées les plus couvrantes pour cartographier la biodiversité ordinaire (les jardins privés par exemple) et ont été conservées pour être croisées avec la radiance SDGSat hiérarchisée à l'aide de quantiles.

2) Zones réglementaires et d'inventaires

Un travail de benchmark des sources de données répliquables décrivant les zones réglementaires et d'inventaire a permis de retenir 12 sources et de les fusionner dans trois macro-couches :



L'approche d'analyse de la radiance catégorisée utilisée pour l'occupation du sol a aussi été mobilisée pour les zones réglementaires et d'inventaire. Un exemple est donné ici pour la radiance, ses pics et les zones d'inventaire :



3) Continuités écologiques

Les continuités écologiques apportent une vision de planification territoriale et sont complémentaires avec les autres approches. Elles ont été construites à l'aide des corridors réservoirs du SRCE (Schéma Régional de Cohérence Ecologique) des cours d'eau du SRADDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité du Territoire), des réservoirs biologiques du SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau) et des cours d'eau de catégorie 1 de la base du Sandre.

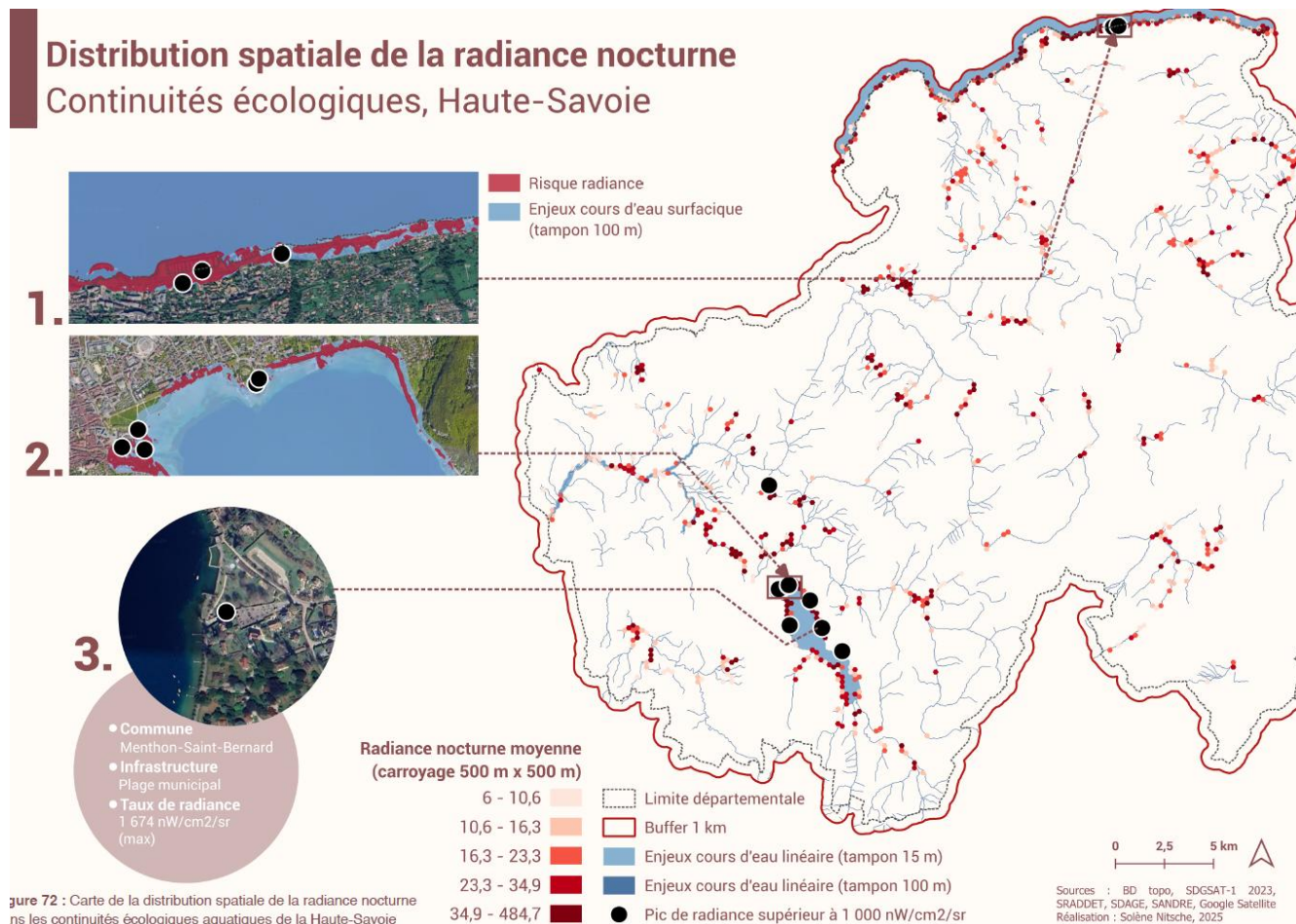
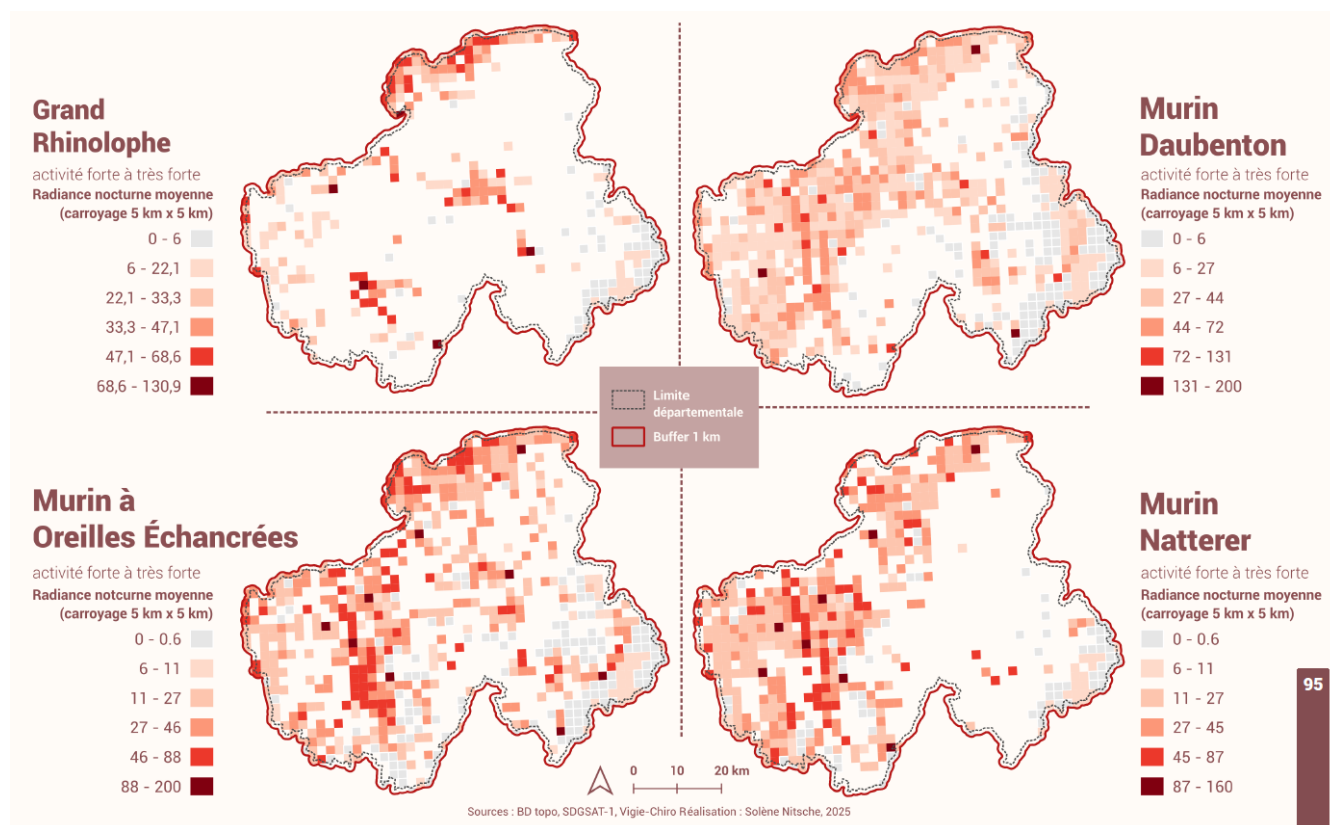


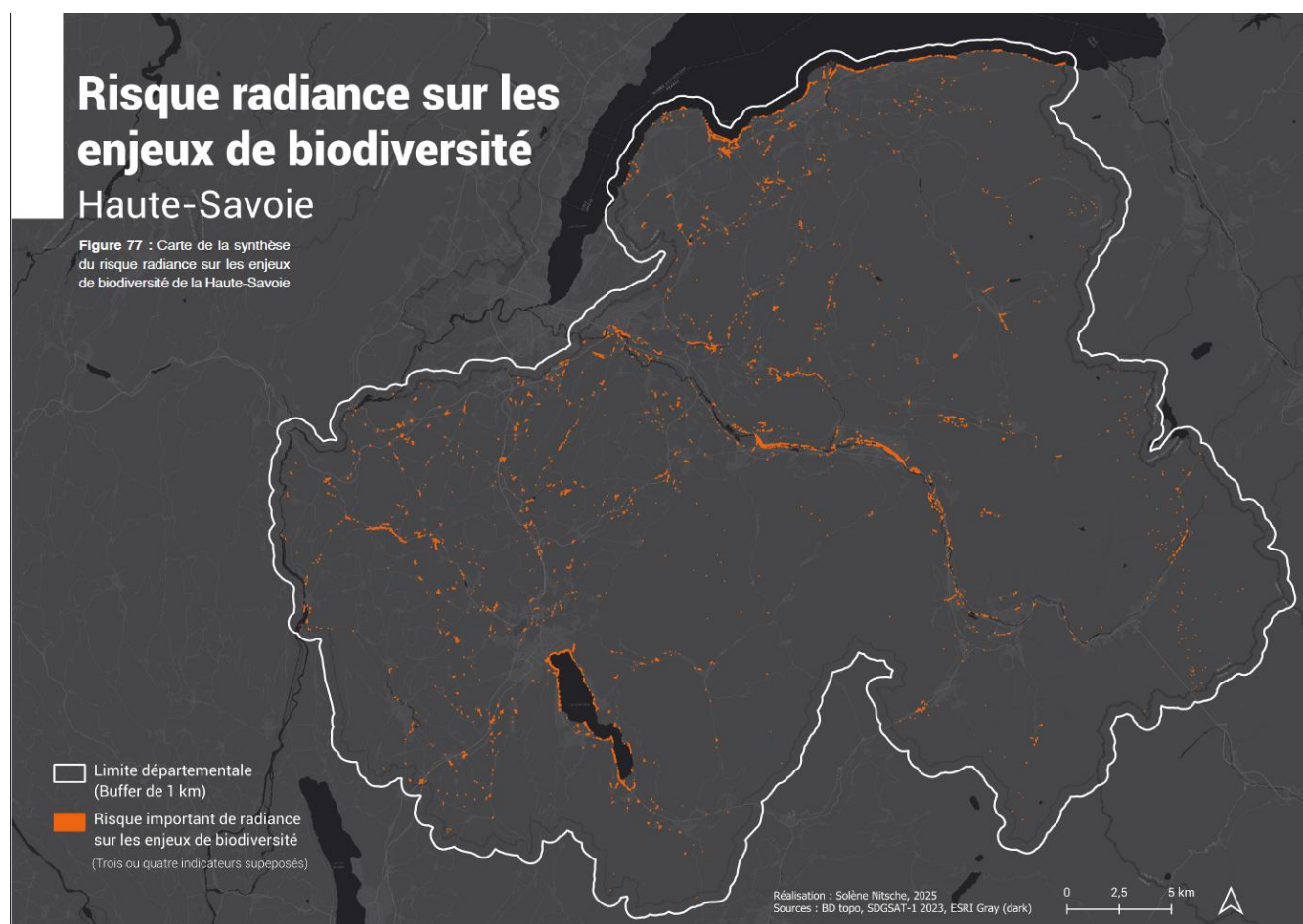
Figure 72 : Carte de la distribution spatiale de la radiance nocturne dans les continuités écologiques aquatiques de la Haute-Savoie

4) Espèces

Un travail détaillé a été effectué autour de la présence d'espèces chiroptères lucifuges grâce à la base de données Vigichiro du MNHN. L'intersection de la présence de ces espèces avec de la radiance perçue de puis le satellite permet de cibler les zones de conflit :



Une cartographie de synthèse multi-critères est proposée au SYANE, lorsqu'une zone est concernée par trois ou quatre des familles d'indicateurs.



2.2 Synthèse des performances

2.2.1 Prétraitements des images satellitaires nocturnes SDGSAT-1

Le recalage géométrique des images a montré de très bonnes performances. Le décalage moyen entre l'image de référence et les images cibles avant correction est de 2.65 pixels (soit 26.5 m pour l'image panchromatique) contre 1.16 pixel (soit 11.6 m pour l'image panchromatique) après correction.

Le débruitage n'a pas pu être validé par manque de données de référence disponibles. Pour s'assurer de la qualité de la méthode développée, le nombre de sources lumineuses de la base de données locale d'éclairage public présentes dans l'image avant et après débruitage a été comparé. Une différence de 2 à 4 % selon les dates d'acquisition a été obtenue. Cette analyse montre que la méthode de débruitage développée conserve bien le signal utile, mais ne permet pas de démontrer que le signal bruité est entièrement supprimé.

Les masques de nuages n'ont pas pu non plus faire l'objet d'une validation par manque de données exogènes disponibles. Cependant, une vérification visuelle a été réalisée sur les images de radiance nocturne (signal dans le visible) et a permis de confirmer des valeurs de radiance inhabituelles (éclairage masqué ou diffus) et donc potentiellement impactées par un couvert nuageux.

Enfin, la correction atmosphérique n'a pas pu être validée, et les résultats se sont avérés très différents de la publication de référence considérée. Cependant, d'autres calculs indépendants réalisés dans le cadre du projet France 2030 HALO ont montré des résultats proches, qui tendent à confirmer la validité de nos résultats.

2.2.2 Indicateurs

2.2.2.1 Radiance moyenne

Cet indicateur n'a pas été validé, étant obtenu directement à partir des données brutes. Son analyse semble cependant confirmer sa pertinence puisque les valeurs moyennes et maximales de radiance sont cohérentes avec la population de la commune.

Pour valider ce produit, une comparaison avec des valeurs obtenues sur d'autres images satellites nocturnes qualifiées (VIIRS par exemple) serait envisageable. Cependant, il n'existe pas d'autre mission nocturne avec les mêmes caractéristiques techniques que SDGSAT-1 (heure de passage, résolution spatiale). De plus, la radiance moyenne issue de SDGSAT-1 doit être interprétée de manière relative et non absolue, en l'absence de correction atmosphérique et de calibration qualifiée.

2.2.2.2 Discrimination de la radiance émise depuis des parcelles privées ou publiques

Un premier développement de trois méthodes complémentaires (croisement direct des pixels éclairés avec les fichiers fonciers, croisement des tâches lumineuses avec les fichiers fonciers, et négatif de la BD locale d'éclairage public) a mené à des statistiques très variables sur le département, et a conduit à simplifier cet indicateur. Uniquement les parcelles dont l'éclairage est très probablement issu d'une contribution privée sont identifiées. L'analyse multi-dates permet d'identifier les parcelles dont la contribution est répétée et stable.

Cependant, cet indicateur identifie davantage de contributions privées (et est également plus fiable) en zones péri-urbaines et rurales qu'en centre urbain, car les parcelles sont plus grandes et plus espacées, ce qui est mieux adapté à la résolution SDGSAT-1 (10 m).

2.2.2.3 Eclairage potentiellement masqué ou dysfonctionnel

L'indicateur d'éclairage potentiellement masqué ou dysfonctionnel a été développé au regard de la visibilité de points lumineux de la base de données d'éclairage. Les choix de seuil d'ombrage ont été réalisés avec la géométrie des scènes observées mais aussi sur des critères basés sur le nombre de points exclus. Le récapitulatif des points d'éclairage public masqués à cause de l'angle de prise de vue est présenté dans le tableau ci-dessous. Le travail de validation de cet indicateur se poursuivra à la suite du projet avec les expertises terrain et base de données du SYANE.

Nombre de points exactement sur un pixel ombragé	Nombre de points avec un pixel ombragé dans un rayon de 10 mètres	Nombre de points avec un pixel ombragé dans un rayon de 20 mètres
16 / 110003	1160 / 110003	2935 / 110003

2.2.2.4 *Référencement des principaux contributeurs à la pollution lumineuse sur le département*

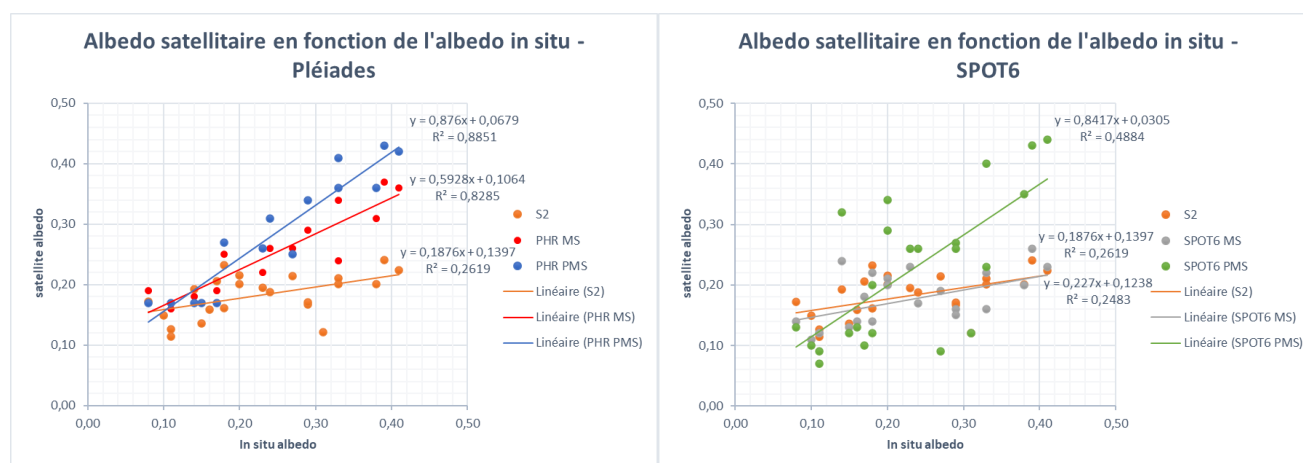
Pour cet indicateur, les pics lumineux sur les zones cadastrées (fichiers fonciers) ont été extraits et classés par ordre d'importance. Cet indicateur consiste en une liste des principaux contributeurs à la pollution lumineuse, et dont l'éclairage persiste sur plusieurs dates. L'analyse multi-dates permet d'identifier les parcelles dont la contribution est répétée et stable.

2.2.2.5 *Cartographie de l'albédo*

La cartographie fournie est basée sur l'imagerie satellitaire diurne SPOT-6 à 1.5 m de résolution après pansharping. Ces données ont montré une assez bonne corrélation avec les mesures in situ d'albédo ($R^2=0.49$), même si leur résolution spatiale reste limitante. De meilleurs résultats ont été obtenus avec Pléiades ($R^2=0.88$), mais il est très compliqué d'imager un département entier avec de l'imagerie à 50 cm. L'analyse de l'albédo Sentinel-2 a montré une trop faible résolution spatiale (10 m) en milieu urbain pour refléter correctement la réalité du terrain.

D'autre part, des artefacts persistent sur la carte d'albédo fournie, comme la présence d'éléments de sur-sol (voitures, arbres, etc.) et la présence d'ombres.

La cartographie départementale de l'albédo permettra au SYANE de mieux dimensionner l'éclairage lors de nouvelles installations ou de travaux de rénovation. En effet, un revêtement très réfléchissant peut permettre d'installer des puissances lumineuses plus faibles qu'à l'accoutumée. Cette cartographie pourra également servir à des travaux sur la surchauffe urbaine.



2.2.2.6 *Impacts sur la biodiversité*

La validation de la pression locale de l'éclairage sur la biodiversité nécessiterait un travail de suivi écologique multi-espèces sur le terrain à toutes les saisons, avec et sans la lumière. L'objectif du projet n'étant pas de réaliser un diagnostic mais d'identifier les zones où de l'éclairage est présent et où la biodiversité l'est aussi. En ce sens, les confrontations des pixels lumineux avec la base de données d'éclairage réalisée en 2.2.2.3 sont pertinentes pour valider le principe. Comme le travail n'a pas pu expliquer 100% des cas d'éclairage qui n'ont jamais pu être détectés, il est possible qu'il s'accompagne d'une légère sous-estimation des zones couvertes par de la lumière directe au sol, compensée par les zones de tampon appliquées autour des pixels lumineux. Pour la présence de biodiversité sur les différentes approches, les sources de données utilisées (espèces, zonages réglementaires et OCS) ont chacune été validées par les producteurs de données.

2.2.2.7 Autres indicateurs explorés mais non livrés

2.2.2.7.1 Variation saisonnière de la radiance

Cet indicateur avait pour objectif de quantifier la différence de radiance nocturne observée entre l'été et l'hiver, principalement due au masquage de sources lumineuses par la végétation. Des données Sentinel-2 et CoSIA ont été considérées pour l'identification des zones de peuplements de feuillus.

Des différences notables ont été constatées ponctuellement, sur des zones présentant des alignements d'arbres feuillus de grande hauteur, mais le phénomène n'a pas pu être généralisé à l'échelle du département. De plus, les acquisitions disponibles se situent hors de l'été (juin-septembre) à cause de l'heure de passage du satellite (~21h-22h), trop proche du coucher du soleil en été à la latitude de la France.

2.2.2.7.2 Mauvaise orientation de l'éclairage suspectée

Cet indicateur direct avait pour objectif de détecter les sources où une mauvaise orientation est suspectée, avec une source d'éclairage directement tournée vers le ciel.

À la résolution spatiale de SDGSAT-1 (10 mètres), il n'est pas possible d'attribuer un pic de radiance à une source lumineuse individuelle. Chaque pixel intègre le rayonnement émis par plusieurs luminaires ainsi que les réflexions sur les surfaces environnantes. L'indicateur ne permet donc pas de caractériser directement un éclairage mal orienté vers le ciel, mais uniquement de localiser les zones émettant de très forts niveaux de radiance. Cet indicateur a donc été regroupé avec l'indicateur « principaux contributeurs à la pollution lumineuse ».

2.2.2.7.3 Type de lampe

Cet indicateur avait pour objectif d'identifier le type de lampe suspecté à partir des pics lumineux extraits de l'image SDGSAT-1 RGB, en utilisant une classification *Random Forest* et les types de sources indiquées la base de données locale d'éclairage public.

Cependant, la base de données présente un trop fort déséquilibre de classes, et l'imagerie SDGSAT-1 semble difficilement exploitable pour ces distinctions. En effet, la résolution de SDGSAT-1 (40 m en RGB) ne permet pas d'associer une tache lumineuse à une seule source d'éclairage, ce qui rend difficile son attribution à un type de lampe particulier. La bande bleue de SDGSAT-1 n'inclut pas non plus le second pic d'émission des LED. Enfin, le manque de correction atmosphérique peut entraîner une sous-estimation de la part de bleu dans l'image.

Les mauvaises performances obtenues (F1-Score de 68% pour les SHP et de 42% pour les LED) ont mené à la décision de ne pas livrer cet indicateur.

2.2.2.7.4 Modélisation de l'éclairage perçu depuis le ciel et comparaison avec l'imagerie satellitaire

Cet indicateur avait pour objectif de modéliser la lumière attendue depuis le ciel à l'aide de la base de données locale d'éclairage et de la cartographie de l'albédo. Il a été abandonné à cause de l'incapacité de prendre en compte correctement l'albédo sur les jeux de données d'éclairage connus, mais aussi suite aux explorations infructueuses réalisées sur la correction atmosphérique.

2.3 Données et produits livrés à l'acteur local (Syane) pour l'aide à la décision

Plusieurs niveaux de livrables ont été fournis au Syane :

- Indicateurs et cartes au format SIG (vectoriels) : couches SIG et projet QGIS
- Liste CSV des principaux contributeurs
- Outils de visualisation en ligne (dashboards html) pour :
 - la radiance moyenne par maille (commune et maille hexagonale) ;
 - les séries temporelles de radiance par commune ;
 - les graphes de croisement entre la radiance, la population et la surface éclairée.

3 DISCUSSION

3.1 Retours utilisateurs

L'utilisateur principal des résultats du projet, le SYANE, a été pleinement impliqué dans le développement du projet ORENOS, avec le nécessaire recueil sur le besoin initial puis des échanges mensuels sur l'avancement du projet et la production des indicateurs.

Le SYANE est très satisfait des résultats et des couches livrées, qui couvrent les deux thématiques prévues : **la connaissance de son parc d'éclairage et les impacts de l'éclairage au sens large sur la biodiversité**. La profondeur temporelle des indicateurs de radiance livrés permet aux équipes du SYANE de mieux comprendre certaines dynamiques qui dépassent l'éclairage public. La vision à grande échelle des plus gros contributeurs, avec une notion de récurrence outille le SYANE dans son travail d'accompagnement des communes sur la pollution lumineuse qui touche largement l'éclairage privé sur lequel les acteurs publics manquaient de connaissance et de données. Les cartographies précises de pression sur la biodiversité seront aussi un outil précieux d'analyse de priorisation des rénovations.

Le projet a aussi ouvert de nouvelles perspectives pour le SYANE au travers de la cartographie de l'albedo une prise en compte plus opérationnelle et effective de la réflexion de la lumière sur les revêtements. Il a aussi exploré des pistes intéressantes pour le SYANE sur l'automatisation de la classification des voiries pour les dynamiques de Schéma Directeur d'Aménagement Lumière sur le territoire qu'il souhaite accompagner.

Selon le SYANE, le service développé est adapté à un acteur tel qu'un syndicat d'éclairage départemental. L'outil de pression sur la biodiversité pourrait être plus adapté (dans le volet suivi sur le long terme avec plusieurs millésimes) à un acteur de type EPCI. Le SYANE envisage possible de recourir au service en fin de mandature (dans 6 ans) pour ré-évaluer le diagnostic. Le SYANE ne considère pas cependant d'acheter ce type de service pour une fréquence de mise à jour plus rapide que l'échelle de la mandature.

3.2 Apports du projet

De nombreux défis techniques ont été relevés dans le projet ORENOS :

- **Traitement des images SDGSAT-1** : recalage géométrique et débruitage des images nocturnes performants.
- **Meilleure connaissance des données SDGSAT-1** : mise en relation avec le CBAS via le CNES présent à l'ambassade de France à Pékin. Projets de collaborations à développer avec le CBAS.
- **Correction atmosphérique des images de jour et obtention d'un albedo solaire satellitaire**, utile pour différents usages.
- **Construction de nombreux indicateurs utiles pour le SYANE, dans ses offres de service pour les communes, mais aussi dans sa stratégie de connaissance des impacts de son parc et de gestion de la sensibilisation autour des éclairages privés.**

3.3 Limites

3.3.1 Limites intrinsèques des données satellitaires

Pour améliorer les résultats, nous avons observé qu'il serait nécessaire de disposer d'images satellitaires nocturnes satisfaisant les critères suivants :

- Haute précision native de localisation
- Connaissance précise des conditions de prise de vue (angles de visée, conditions atmosphérique)
- Maîtrise de la radiométrie du capteur (bruit instrument, effets de stries, etc.)
- Correction atmosphérique

Notons également que les données SDGSAT-1 ne sont pas utilisables dans un cadre commercial. Il n'est pas possible de développer un service commercial ou une offre de service avec ces données. Cependant, d'autres satellites nocturnes français ou européens, commerciaux ou scientifiques, à résolution décimétrique, pourraient émerger à l'avenir. Les méthodes développées dans le projet ORENOS pourraient être appliquées à ces données et un service commercial pourrait émerger.

3.3.2 Autres limitations rencontrées dans le projet

- **Développement d'une correction atmosphérique** : abandonnée par manque de validation disponible et manque de temps. Cet aspect sera davantage creusé dans le projet HALO (contribution de ACRI-ST).
- **Modélisation de la radiance attendue** : pas de lien identifié entre l'albédo de surface et la radiance observée du ciel, pour un même type de luminaires. Un produit d'albédo plus précis et d'images nocturnes mieux recalées/plus fines sont nécessaires pour améliorer ces travaux.
- **Éclairage dysfonctionnel** : beaucoup de limitations : impact potentiel du flicker, du masquage par la végétation, résidu de décalage géométrique
- **Distinction éclairage public/privé** : complexe d'identifier la source exacte à cause de la résolution spatiale à 10 m, des pixels mixtes en milieu urbain et de la radiance qui se diffuse sur plusieurs parcelles.
- **Distinction des types des sources** : abandonné à cause de résultats mitigés. Sources d'erreurs :
 - o Résolution de SDGSAT (10 m PAN, 40 m RGB) ne permettant pas d'associer une tâche lumineuse à une seule source d'éclairage
 - o Bande bleue de SDGSAT n'incluant pas le second pic d'émission des LED
 - o Validité et mise à jour de la BD EP locale
 - o Manque de correction atmosphérique
- **Mauvaise orientation suspectée** : la résolution spatiale de SDGSAT-1 (10 mètres) ne permet pas d'attribuer un pic de radiance à une source lumineuse individuelle

3.4 Perspectives

L'ensemble des limites citées ci-dessus seront adressées à l'avenir dans le cadre d'autres projets connexes.

Les membres du consortium ORENOS sont impliqués dans plusieurs projets intégrant de l'imagerie satellitaire nocturne. Le projet ORENOS a permis de développer des outils et méthodes d'exploitation de ces images qui seront ré-utilisés et améliorés dans ces futurs projets.

Ces améliorations pourront concerner les traitements géométriques, radiométriques, la correction atmosphérique et des nuages, le développement d'un albédo satellitaire et son utilisation, mais également le développement des indicateurs.

La TeleScop et le Cerema sont notamment impliqués dans le projet France 2030 HALO – Eclairage nocturne et pollution lumineuse, dans lequel des satellites à très haute résolution spatiale sont testés en fonctionnement nocturne et exploités pour produire des indicateurs. Ces indicateurs se recoupent en partie avec les indicateurs développés dans ORENOS (type de lampe, orientation, albédo, contribution publique ou privée, impact sur la biodiversité, etc.). Une sous-partie du projet HALO considère également les données SDGSAT-1.

Le projet ORENOS a aussi démontré l'importance de disposer de données satellitaires nocturnes de très bonne qualité et à haute résolution spatiale. Le pôle satellite du Cerema est impliqué dans une équipe européenne de chercheurs mobilisée sur ce sujet.

3.5 Niveau de TRL atteint

Le niveau de TRL de l'utilisation de SDGSAT-1 pour la priorisation des actions de gestion d'un parc d'éclairage était estimé à 3 lors du montage du projet et l'objectif était de le monter à 6-7, avec un prototype fonctionnel dans un environnement opérationnel ou en tout cas représentatif du marché potentiel.

Les premiers développements techniques autour de la donnée (sans correction atmosphérique, avec des variations entre les dates difficiles à expliquer, avec une potentielle présence de flickering) ont mené à une réévaluation du TRL de départ à 1 ou 2. En effet, les barrières technologiques et scientifiques à franchir étaient plus hautes que prévues. Des échanges avec la communauté scientifique internationale sur le sujet, avec les producteurs de la donnée, et un travail de remise en question de la littérature scientifique sur le sujet de la correction atmosphérique ont centré une partie non négligeable du travail sur la montée en TRL entre 1 et 3. Le développement des indicateurs et leur appropriation par le SYANE permettent de décrire un TRL de fin de projet à 5 avec des maquettes fonctionnelles. La poursuite de la déclinaison dans l'opérationnel des productions du projet dans les prochains mois pourraient justifier une estimation de TRL effectif à 6 et considérer le service fourni comme un prototype fonctionnel dans un environnement représentatif du marché.

3.6 Performance environnementale et sociale

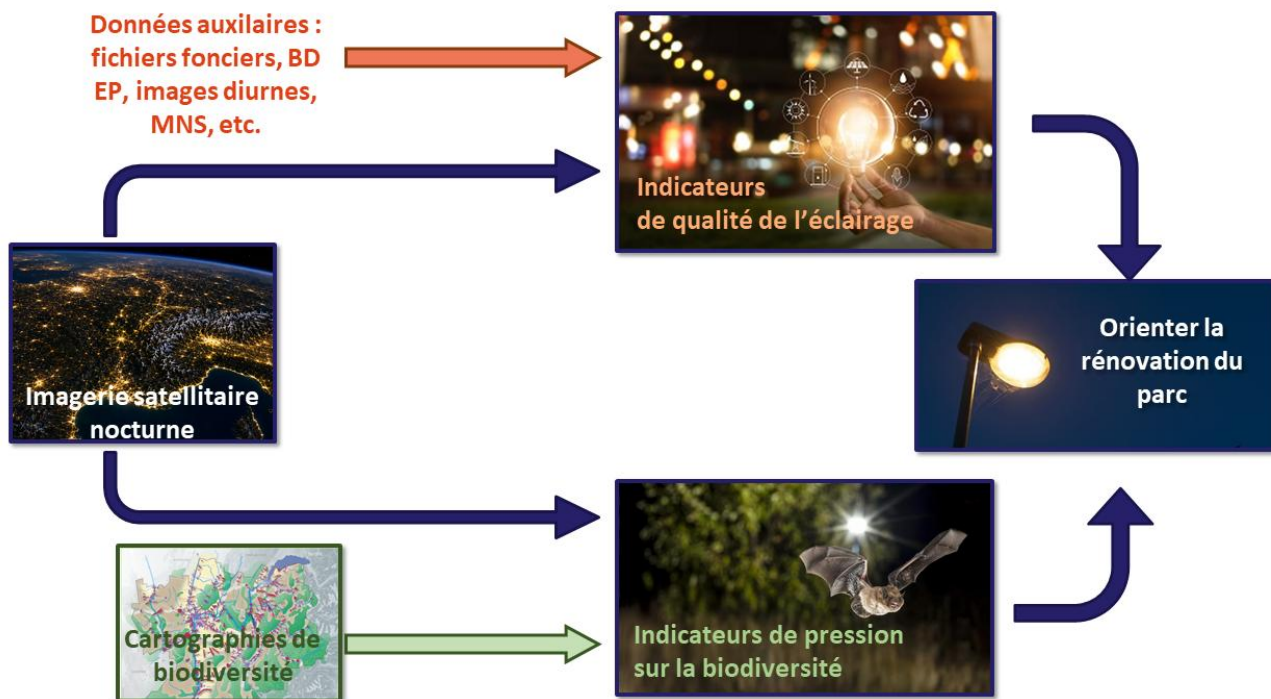
- Matériel utilisé : serveur Dell PowerEdge R960XA avec 2x RTX 6000
- Codes et logiciels optimisés, architecture frugale
- Utilisation de GitHub pour le dépôt et la maintenance des codes.
- Partage de documents uniquement sous forme dématérialisée
- Mise en place d'une plateforme NextCloud pour éviter les envois volumineux par mail
- Données satellitaires utilisées : images satellites d'archives uniquement (SDGSAT-1, Pléiades, SPOT-6, Sentinel-2)
- Hormis la réunion de lancement et celle de clôture, toutes les autres réunions de suivi ont eu lieu en visioconférence pour limiter les déplacements
- Déplacements pour le projet : deux allers-retours à Annecy par 4 agents du Cerema, majoritairement effectués en mobilités décarbonées (train et transports en commun)
- Conférences internationales : uniquement en Europe, et partiellement en mobilités décarbonées
- Impact du projet : le projet a pour vocation d'optimiser l'éclairage public et privé sur le département de la Haute-Savoie, ce qui permettra in fine de réduire la consommation énergétique et donc les émissions de gaz à effet de serre
- Equipe-projet ORENOS mixte : 1/3 de femmes – 2/3 d'hommes

4 NOTE DE SYNTHÈSE VULGARISÉE

Le projet est synthétisé dans les schémas ci-dessous.

Les supports de présentation de la réunion de clôture et de la réunion de restitution seront également partagés avec le CNES.

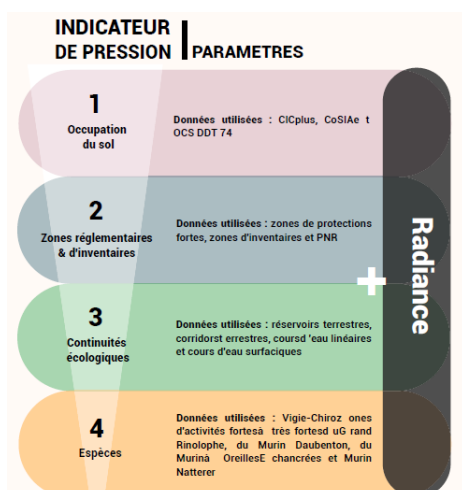
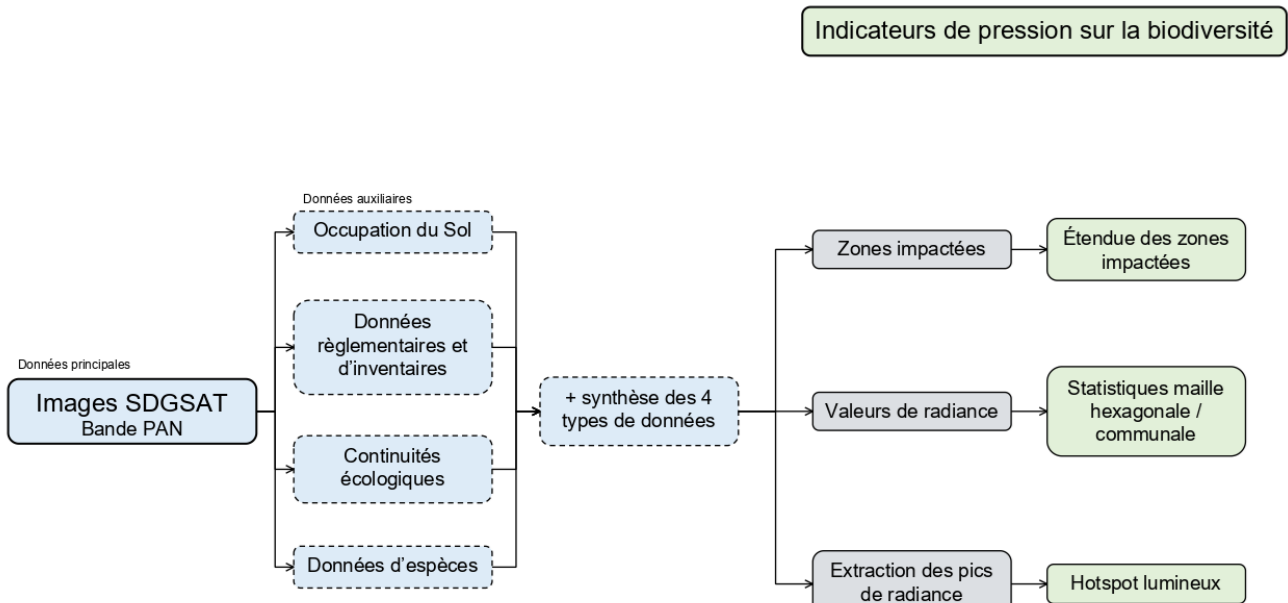
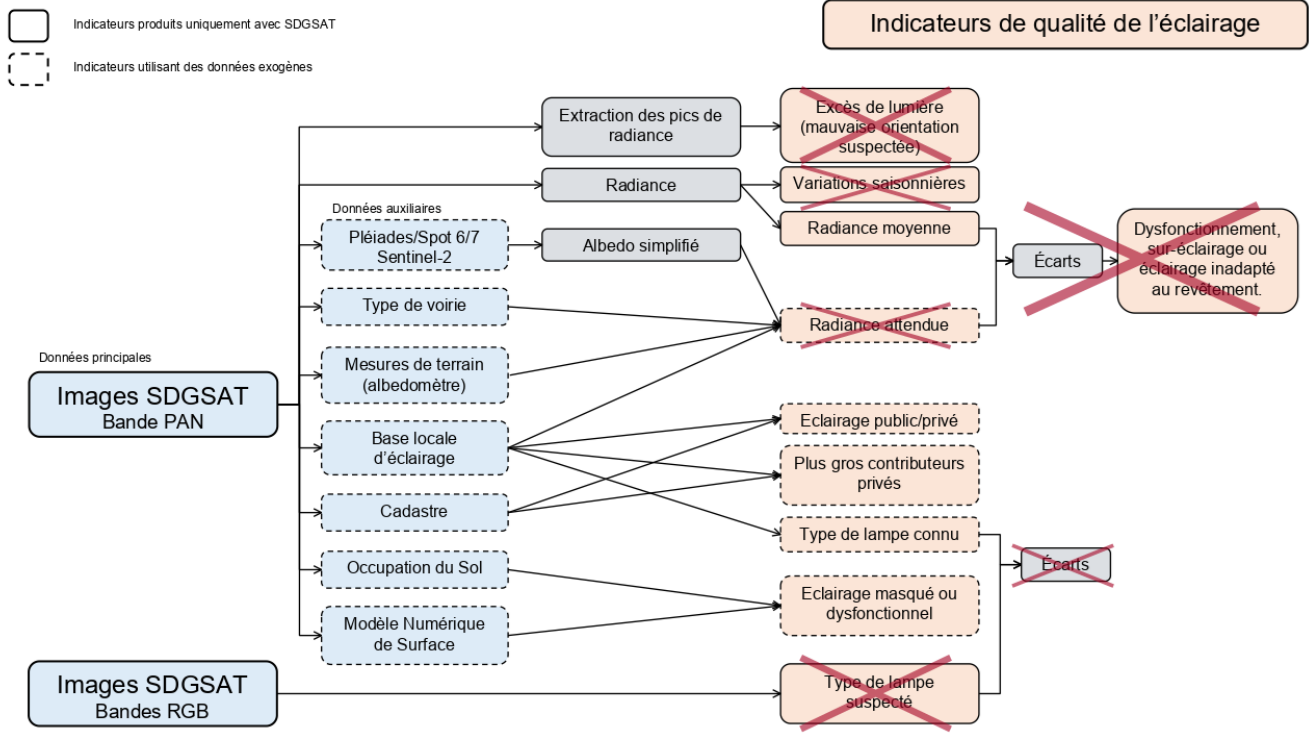
- Principe de la méthode :



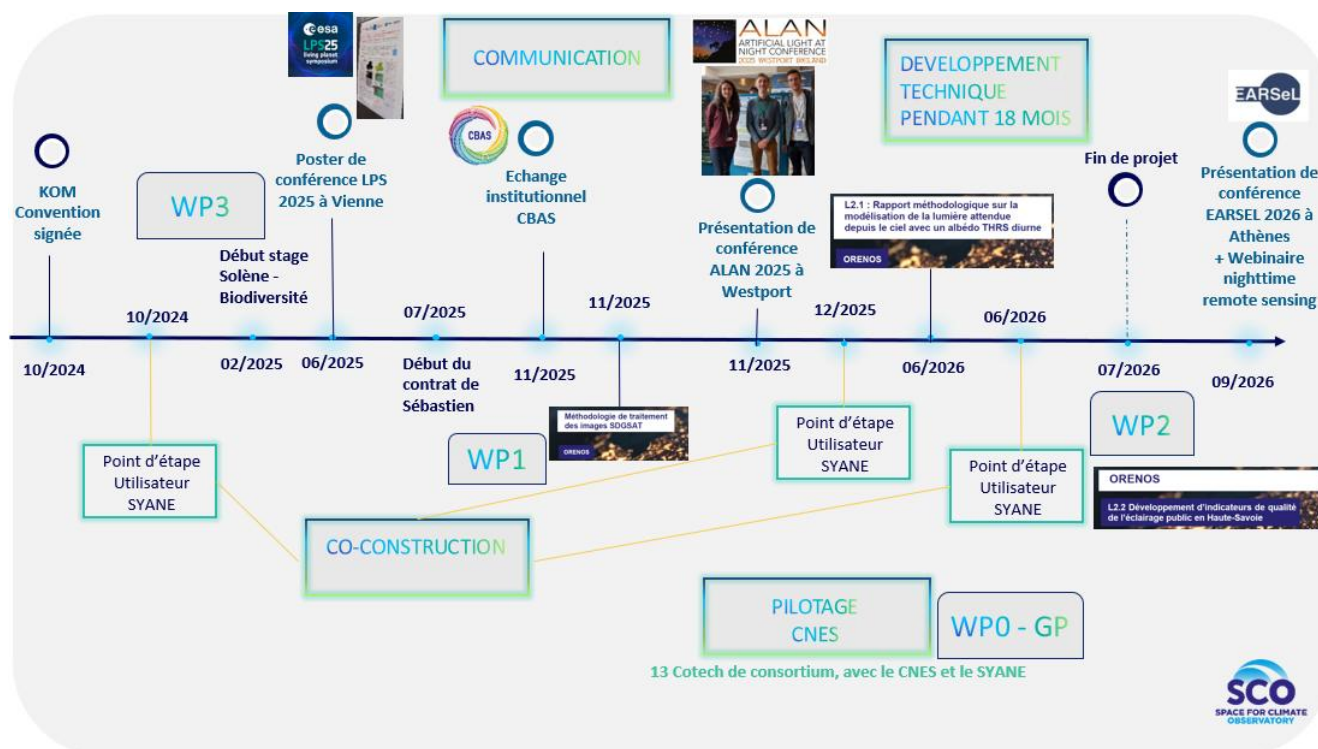
- Indicateurs produits (généré par IA) :



- Détail de la production des indicateurs de qualité de l'éclairage et d'impacts sur la biodiversité :



- Rétrospective projet :



5 VALORISATION

Tout au long du projet, de nombreuses actions de valorisation ont été menées pour présenter le projet et interagir avec la communauté scientifique et les collectivités :

- Page dédiée sur le site du SCO (novembre 2024, <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/orenos>)
- Poster à la conférence Living Planet Symposium (juin 2025, Vienne, Autriche)
- Présentation orale sur le stand Connect by CNES aux GeoDataDays (septembre 2025, Marseille, France)
- Présentation orale à la conférence ALAN 2025 (octobre 2025, Westport, Irlande)
- Vidéo de présentation du projet (décembre 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=PIQGH-hinY>)
- Présentation lors de la 19ème Trimestrielle du SCO France
- Actu sur le site du SCO (avril 2026, <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/orenos-pour-reduire-la-pollution-lumineuse>)
- Actu sur le site du Cerema (mai 2026, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/optimiser-eclairage-exterieur-grace-imagerie-satellitaire>)
- Présentation orale en webinaire nighttime remote sensing (septembre 2026)
- Présentation orale à la conférence EARSEL (septembre 2026, Athènes, Grèce)