



Accompagnement des collectivités de cinq parcs nationaux dans la réduction de la pollution lumineuse et de ses impacts, notamment sur la biodiversité



ANNEXE 3 : Orthophotographie de l'Île de La Réunion



juin 2021



OFB
OFFICE FRANÇAIS
DE LA BIODIVERSITÉ

Terr
Oïko

**DARK
SKY
LAB**

auddicé
biodiversité

Maîtrise d'ouvrage : Parc National des Pyrénées

Financement : Office Français de la Biodiversité

Maîtrise d'œuvre : Groupement TerrOïko – DarkSkyLab – Auddicé biodiversité

Table des matières

1	Introduction	3
2	Contribution des terrains de sport	4
2.1	Analyse des données IGN.....	5
2.2	Analyse des terrains de sport relevés visuellement	12
3	Analyse spectrale de l'orthophotographie	16
4	Evaluation des contributions à l'émission de lumière	18
4.1	Points lumineux d'éclairage public.....	19
4.2	Eclairage des terrains de sport.....	21
4.3	Eclairage privé	21
4.4	Analyse des contributions respectives.....	22
5	Simulation de la pollution lumineuse	22
5.1	Représentation de la pollution lumineuse	23
5.2	Simulation de l'orthophotographie sans extinctions	24
5.3	Scénarios d'extinction sur l'ensemble de l'orthophotographie.....	26
5.4	Scénarios d'extinction sur 16 communes	28
6	Conclusion	31

1 Introduction

Ce rapport a pour objectif de décrire les résultats obtenus dans le cadre de la phase 2 du projet d'accompagnement des collectivités de cinq parcs nationaux dans la réduction de la pollution lumineuse et de ses impacts. Concernant DarkSkyLab, cette phase s'est focalisée sur l'Île de la Réunion et sur l'analyse de l'orthophotographie aérienne fournie dans le cadre du projet. Les aspects suivants ont été spécifiquement traités :

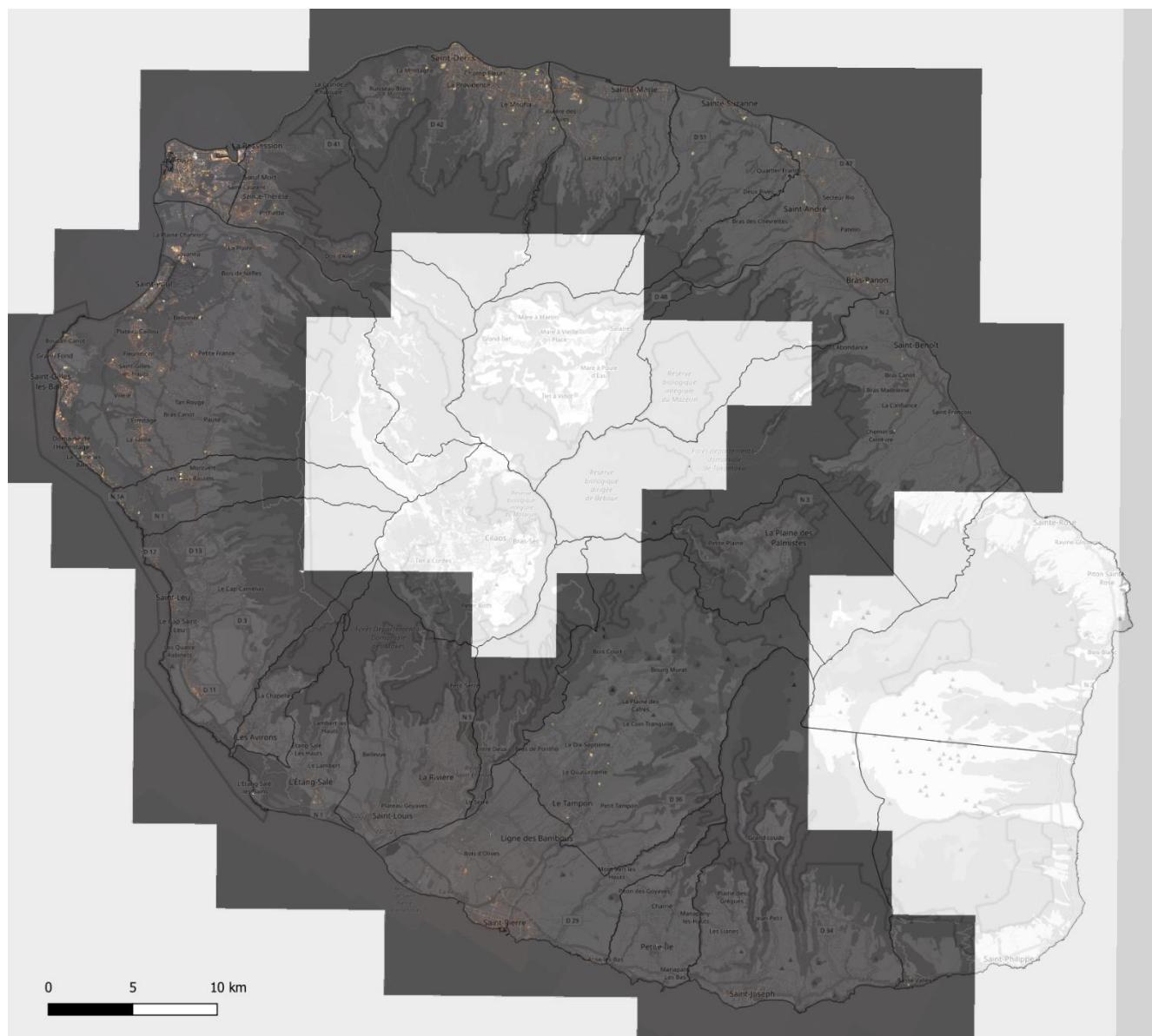
- Identification des terrains de sports éclairés sur tout le territoire de l'île et évaluation de leur contribution à l'émission de radiance¹ lumineuse vers le ciel ;
- Analyse spectrale de l'orthophotographie aérienne afin de déterminer si des différences de couleurs significatives à l'échelle de l'île peuvent être détectées ;
- Evaluation des contributions respectives des points lumineux d'éclairage public, des terrains de sport et de l'éclairage privé à la pollution lumineuse sur l'île ;
- Simulation de la pollution lumineuse sur la base de l'orthophotographie fournie ;
- Evaluation des bénéfices de scénarios d'extinction de l'éclairage public et des terrains de sport.

Il est à noter qu'un objectif important de cette étude est de comprendre l'origine de la pollution lumineuse qui impacte les faibles populations de Pétrels de Barau lors du début de leur migration.

L'orthophotographie nocturne est fournie sur 3 canaux RGB codés sur 8 bits avec une résolution de 1 mètre. Quelques défauts de calage de l'orthophotographie ont pu être constatés (e.g. courts de tennis sur Les Avirons, terrain de football sur Saint-Leu, zone de Saint-Paul) mais le géoréférencement reste malgré tout très convenable sur la plus grande partie de l'île. L'image est relativement inhomogène avec du bruit de fond surtout dans le canal bleu et sur la partie nord-ouest de l'île. Le détail des prises de vue des éléments constitutifs de l'orthophotographie (date et heure des photos, matériel utilisé) n'a pas été fourni.

Toute l'île n'est pas couverte par l'orthophotographie. La carte ci-dessous montre à grande échelle l'orthophotographie assemblée qui a été fournie. Cette dernière couvre les zones les plus peuplées de l'île. Toutefois, les 4 communes de Salazie, Cilaos, Sainte-Rose et Saint-Philippe ne sont pas couvertes par l'orthophotographie, ce qui induit des limitations dans l'utilisation qui peut en être faite, à la fois pour l'analyse de la contribution des terrains de sport et pour les simulations de pollution lumineuse à partir de l'orthophotographie.

¹ La radiance, ou luminance énergétique, est la puissance par unité de surface et dans une direction donnée qui est émise depuis le sol et qui est enregistrée par l'instrument utilisé pour l'orthophotographie nocturne.



Orthophotographie nocturne fournie dans le cadre du projet

2 Contribution des terrains de sport

Une première analyse rapide de l'orthophotographie aérienne montre qu'une radiance significative est émise par les terrains de sport éclairés à de nombreux endroits sur l'île. Il est donc apparu important d'évaluer la contribution des terrains de sport éclairés et pour cela deux approches ont été utilisées :

1. L'ensemble des terrains de sport sur toute l'île a été analysé à partir de la BD TOPO de l'IGN accessible librement². Cette base de données fournit une couche vectorielle qui recense l'ensemble des terrains de sport déclarés et fournit leurs contours. Dans cette approche, les tracés retenus limitent la plupart du temps la radiance aux contours des terrains eux-mêmes ce qui fait que l'on ignore une partie de la radiance émise par les infrastructures à proximité ;

² Voir <https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html>

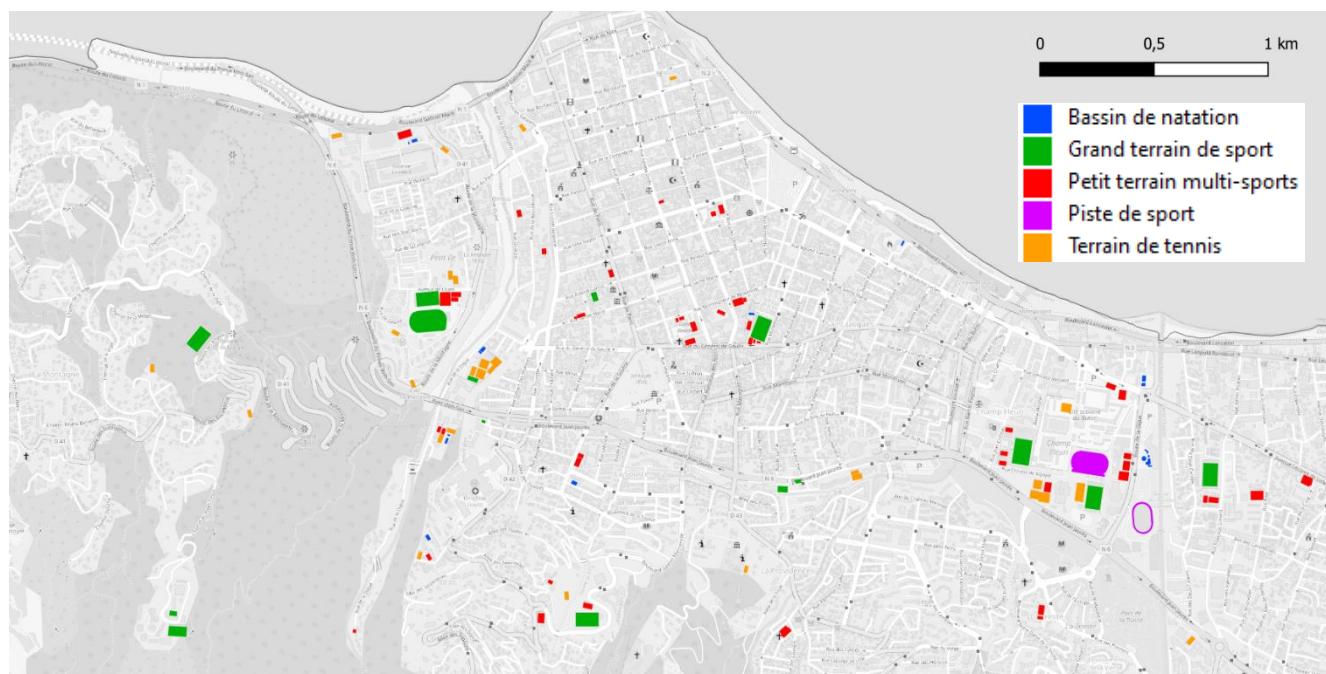
2. Une analyse visuelle a été réalisée en positionnant l'orthophotographie nocturne en transparence sur une couche « Google Satellite » et en repérant les principaux terrains éclairés. Dans cette approche, un tracé manuel de la zone de radiance a été réalisé en englobant les infrastructures qui sont rattachées aux terrains de sport.

2.1 Analyse des données IGN

La BD TOPO de l'IGN fournit une couche shapefile qui inclut **1186** terrains de sports. Ceux-ci sont répartis en 5 types différents :

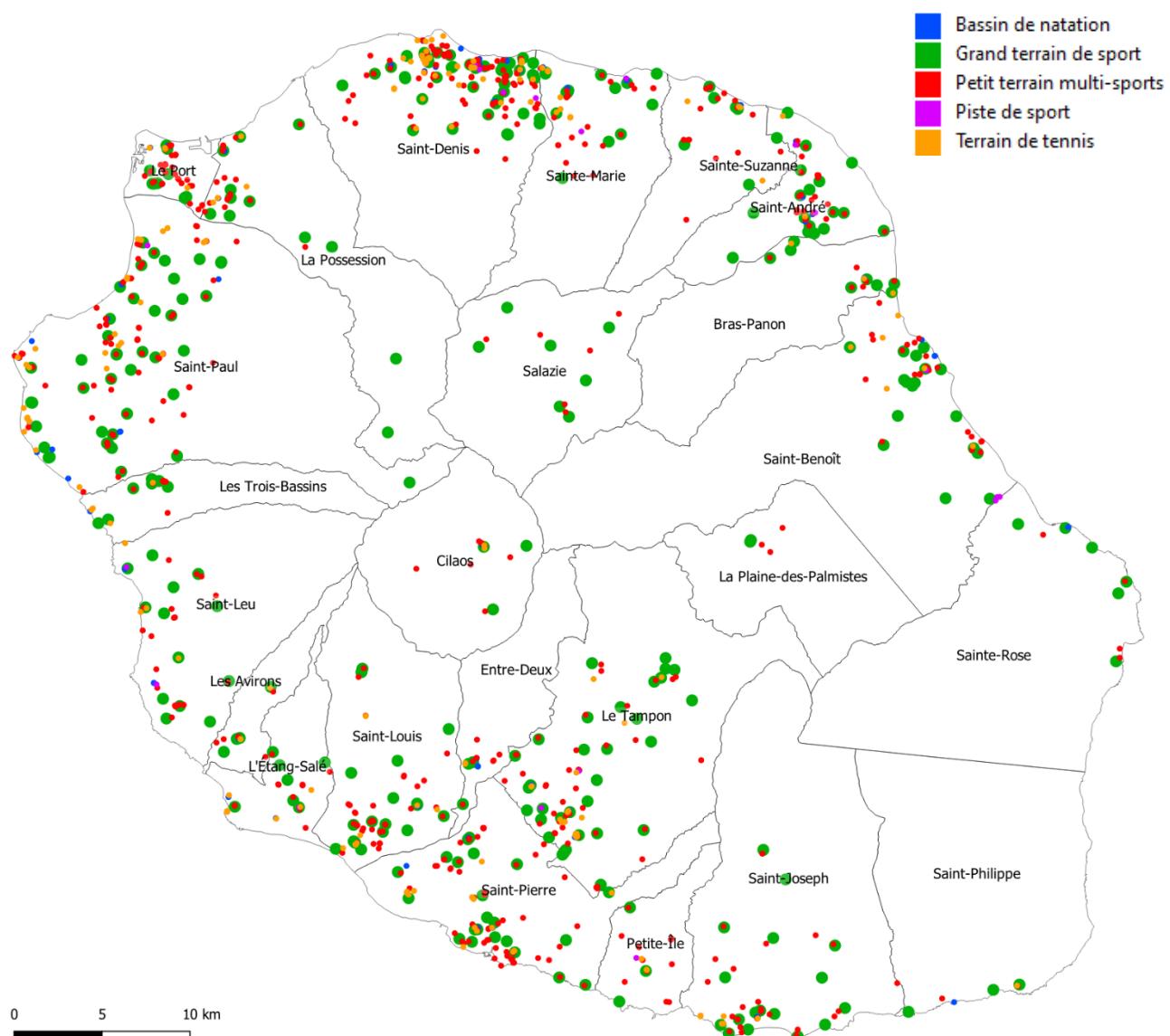
- Grand terrain de sport ;
- Petit terrain multi-sports ;
- Terrain de tennis ;
- Bassin de natation ;
- Piste de sport.

La carte ci-dessous montre la zone du centre de Saint-Denis avec en fond une carte OpenStreetMap et les terrains de sport dans différentes couleurs selon leur type.



Terrains de sport sur le centre de Saint-Denis

Les positions de tous les terrains de sport de l'île présents dans la base de données IGN sont montrés dans la carte ci-dessous avec les mêmes codes couleur. Les grands terrains de sport, essentiellement des terrains de football, sont tracés en vert avec des pastilles plus importantes que pour les autres types de terrains.



Positions des 1186 terrains de sport sur l'île de la Réunion

Une étude statistique des radiances associées aux terrains de sport de la base de données IGN a été réalisée. Afin de mener à bien cette tâche, l'orthophotographie nocturne a été traitée de la façon suivante :

1. Transformation des 3 canaux RGB en une image de radiance monochrome avec un seul canal de niveaux de gris où chaque pixel est exprimé avec une valeur entre 0 et 255 (chaque pixel de 1 m² est donc codé sur 8 bits). La formule de transformation utilisée est la suivante (CCIR 601) :

$$0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B$$

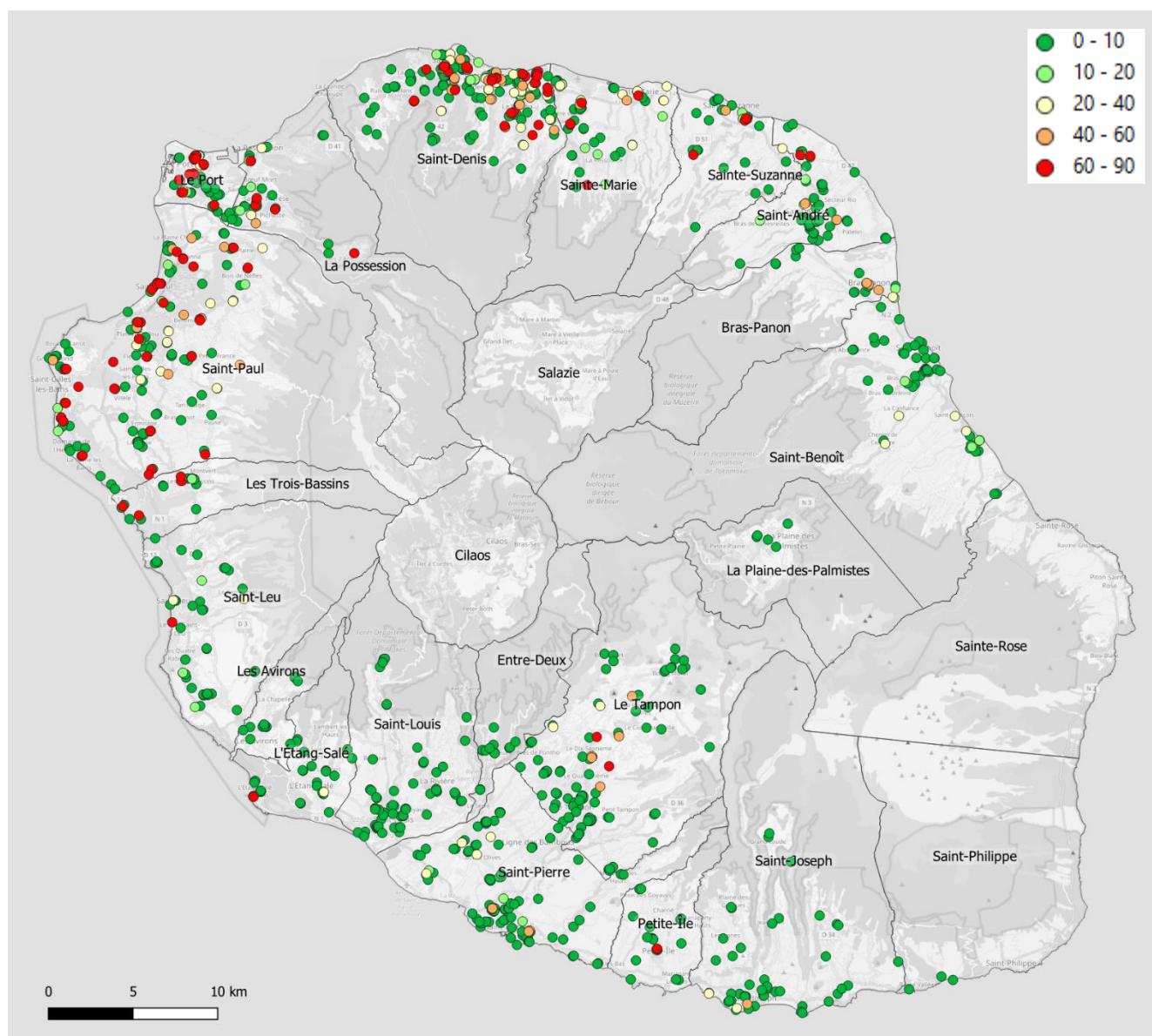
2. Rééchantillonnage de l'image de radiance monochrome obtenue avec un pas de 10 mètres de manière à rendre les calculs statistiques possibles.
3. Conversion des niveaux de gris en unités de radiance exprimées en Watts par mètre carré et par stéradian (W.m⁻².sr⁻¹). Cette unité de radiance, qui représente une puissance par unité de surface et par angle solide, est celle qui est traditionnellement utilisée pour représenter les radiances nocturnes émises depuis le sol que ce soit depuis un avion ou depuis un satellite.

Une autre unité équivalente à un facteur 10^{-5} près qui est souvent utilisée est le $\text{nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. La conversion a été réalisée de manière empirique en utilisant en plusieurs points de l'île les niveaux de radiance obtenus depuis les données satellite VIIRS-DNB³ d'un jeu synthétique assemblé à partir de radiances satellites mensuelles de l'année 2020. Ce processus de création d'un jeu synthétique à partir de données de radiances mensuelles a été développé par DarkSkyLab. Les valeurs de radiance satellite sur les points retenus ont été mises en regard des valeurs de l'échelle monochrome arbitraire utilisée dans l'orthophotographie afin de réaliser la conversion. La radiance maximale est observée sur la zone du port dans la commune du Port avec un niveau d'environ $90 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. Ce niveau de radiance est ce qui est typiquement observé au cœur d'une ville de grande taille comme Lyon (des radiances plus élevées sont observées sur des métropoles comme Paris avec $110 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ou bien des plateformes aéroportuaires comme l'aéroport Charles de Gaulle avec plus de $230 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$). La radiance maximale observée sur la commune de Saint-Denis est de l'ordre de $40 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, ce qui est un niveau typique d'une ville de taille moyenne comme Angoulême.

On dispose donc en final d'une carte de radiance exploitable pour réaliser des statistiques sur toutes les zones de l'île couverte par l'orthophotographie. Il est alors possible de calculer la radiance moyenne sur chacun des terrains de sport. La carte suivante montre les radiances moyennes de tous les terrains de sport couverts par l'orthophotographie (il y en a 1137 sur les 1186 de l'île) selon 5 classes avec les intervalles suivants :

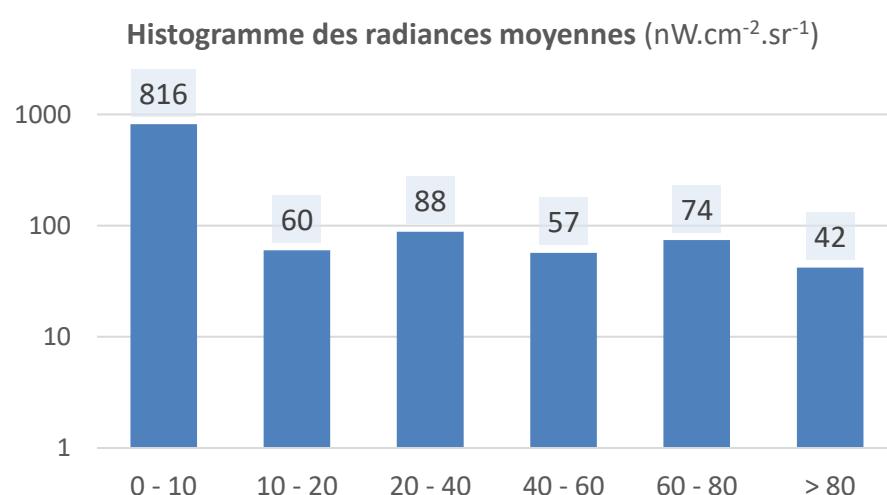
- 0 à $10 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ avec la couleur vert foncé ;
- 10 à $20 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ avec la couleur vert clair ;
- 20 à $40 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ avec la couleur jaune ;
- 40 à $60 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ avec la couleur vert orange ;
- 60 à $90 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ avec la couleur rouge.

³ Voir les données du NOAA sur https://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html



Radiance moyenne sur les terrains de sports couverts par l'orthophotographie en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$

Le graphique ci-dessous montre l'histogramme obtenu à partir des radiances moyennes calculées sur chacun des terrains (l'échelle verticale de l'histogramme est logarithmique).



On peut constater que la grande majorité des terrains n'émet que très peu voire pas de radiance du tout : 816 terrains sur les 1137 couverts par l'orthophotographie ont une radiance moyenne inférieure à $1 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. Sur ces 816 terrains, 420 ont une radiance inférieure à $1 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ qui peut être considérée comme la limite du bruit de l'orthophotographie nocturne dans les zones habitées de l'île.

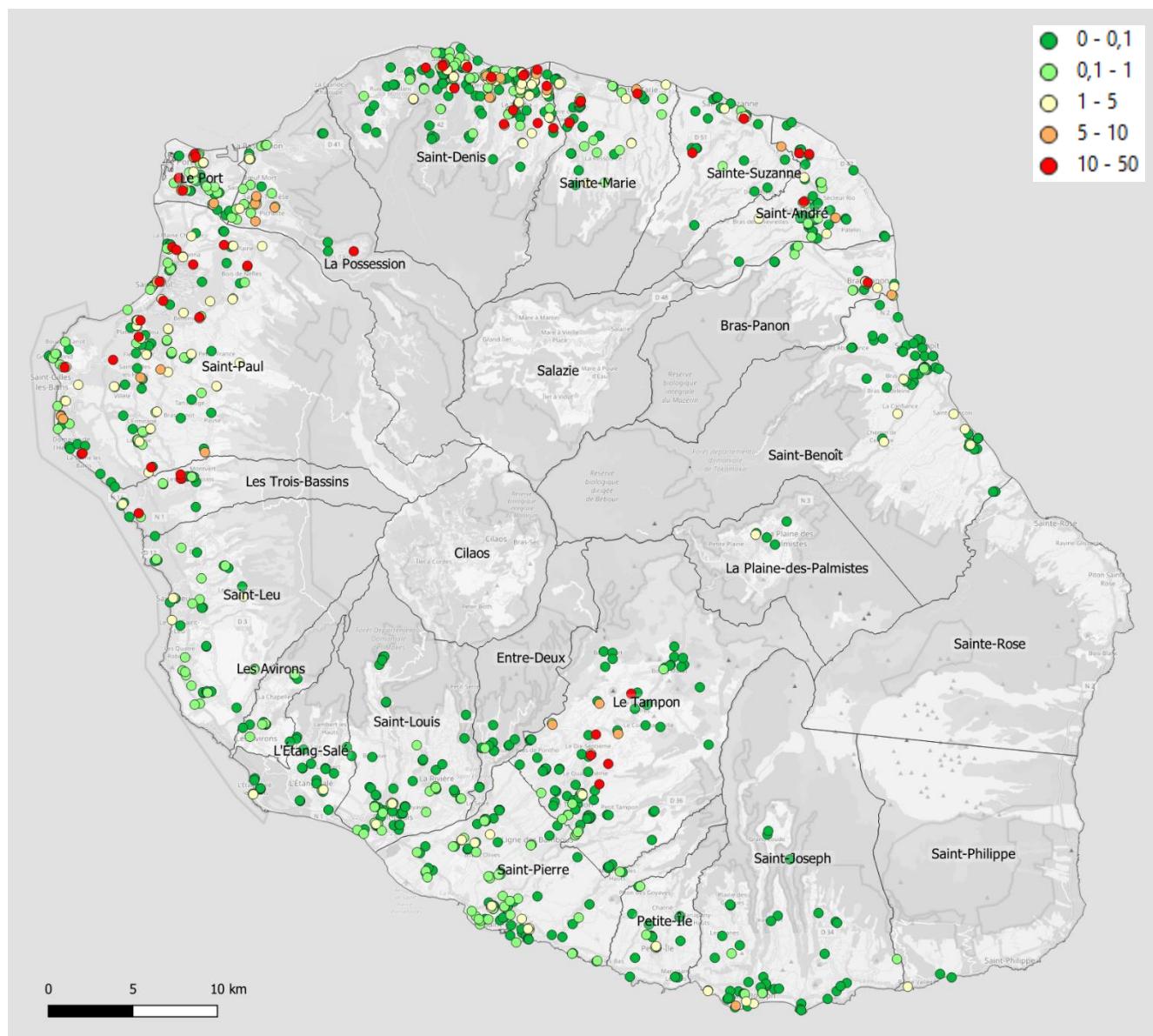
Il y a 173 terrains qui émettent plus de $40 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, valeur à partir de laquelle on peut considérer que la contribution à la création d'un halo est notable. 42 terrains émettent plus de $80 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ qui représente une valeur de radiance très élevée.

Les radiances moyennes ne rendent toutefois pas compte de la puissance lumineuse émise par les terrains de sport étant donné que leurs surfaces peuvent être bien sûr très différentes. Afin d'obtenir une meilleure compréhension de la contribution des terrains de sport à l'émission de lumière dans l'environnement nocturne, la radiance a été intégrée sur les différents terrains en prenant en compte leur surface afin de déterminer leur flux observé en Watts. La formule utilisée pour ce calcul est la suivante (on multiplie la demi-sphère projetée, soit π , par la surface et par la luminance) :

$$\Phi = \pi S L \quad \text{où } \Phi \text{ est le flux (W), } S \text{ la surface (m}^2\text{) et } L \text{ la radiance (W. m}^{-2}.\text{sr}^{-1}\text{)}$$

Le **flux**, qui est une puissance, est donc différent de la **radiance** qui représente une puissance par unité de surface selon un angle solide donné. La carte suivante montre les flux associés à tous les terrains de sport couverts par l'orthophotographie selon 5 classes avec les intervalles suivants :

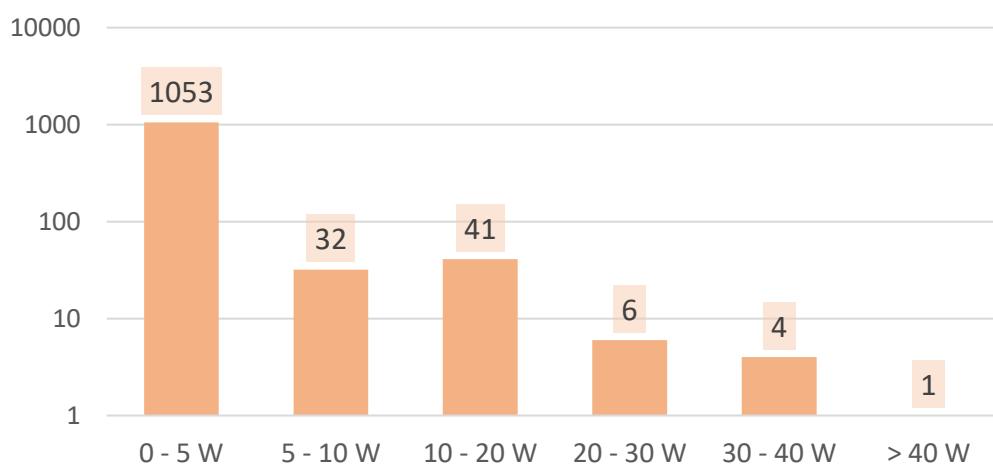
- 0 à 0,1 W avec la couleur vert foncé ;
- 0,1 à 1 W avec la couleur vert clair ;
- 1 à 5 W avec la couleur jaune ;
- 5 à 10 W avec la couleur vert orange ;
- 10 à 50 W avec la couleur rouge.



Flux émis par les terrains de sports couverts par l'orthophotographie en Watts

Il est alors possible de tracer l'histogramme de ces flux :

Histogramme des flux (en W)



Là aussi, on peut constater que la grande majorité des terrains n'émet qu'un flux très faible voire pas de flux du tout (916 terrains de sport sur les 1053 de la première classe de l'histogramme ont même un flux inférieur à 1 Watt).

Les flux calculés en Watts peuvent sembler faibles mais il faut se rappeler que l'on parle ici de flux mesurés depuis un instrument à une altitude élevée. Si l'on rapporte les flux à la surface en km^2 , on obtient des valeurs de quelques centaines à plusieurs milliers de Watts par km^2 , ce qui est typique des données obtenues par des mesures satellite. Ainsi, le terrain de sport qui émet le plus de flux sur l'île de la Réunion (le stade Georges Lambrakis sur la commune du Port) a un flux mesuré de 47 W environ, ce qui ramené à sa surface de 19 000 m^2 (soit environ 0,02 km^2) représente 2 450 $\text{W}\cdot\text{km}^{-2}$. Il s'agit d'une valeur typique associé au centre d'une très grande métropole⁴.

La carte précédente montre que les émissions de lumière les plus importantes des terrains de sport dans l'environnement nocturne se produisent au nord-ouest de l'île (sur les communes de Saint-Paul, du Port et des Trois Bassins) et sur la commune de Saint-Denis. Quelques terrains avec une forte émission sont aussi présents plus près du centre de l'île sur les communes du Tampon et de La Possession. La zone nord-est possède aussi quelques terrains à forte émission sur les communes de Sainte-Marie, Sainte-Suzanne et Saint-André.

Une carte de diffusion de type « heatmap » des positions des terrains de sport pondérée par les flux est montrée ci-dessous. Elle permet de se rendre compte rapidement des endroits de l'île les plus impactés par l'émission de lumière des terrains de sport dans l'environnement nocturne.

⁴ Voir par exemple :

https://www.researchgate.net/publication/261597024_The_relation_of_outdoor_lighting_characteristics_to_sky_glow_from_distant_cities



« Heatmap » des localisations des terrains de sport pondérée par les flux lumineux

2.2 Analyse des terrains de sport relevés visuellement

Comme indiqué au début de cette section, la radiance des terrains de sport n'est pas totalement prise en compte lorsque l'on utilise les contours fournis par la BD TOPO de l'IGN. En effet, l'éclairage « déborde » des terrains eux-mêmes dans de nombreux cas (surtout pour des grands terrains fortement éclairés) et il existe aussi des éclairages d'équipements annexes qui ne sont pas pris en compte.

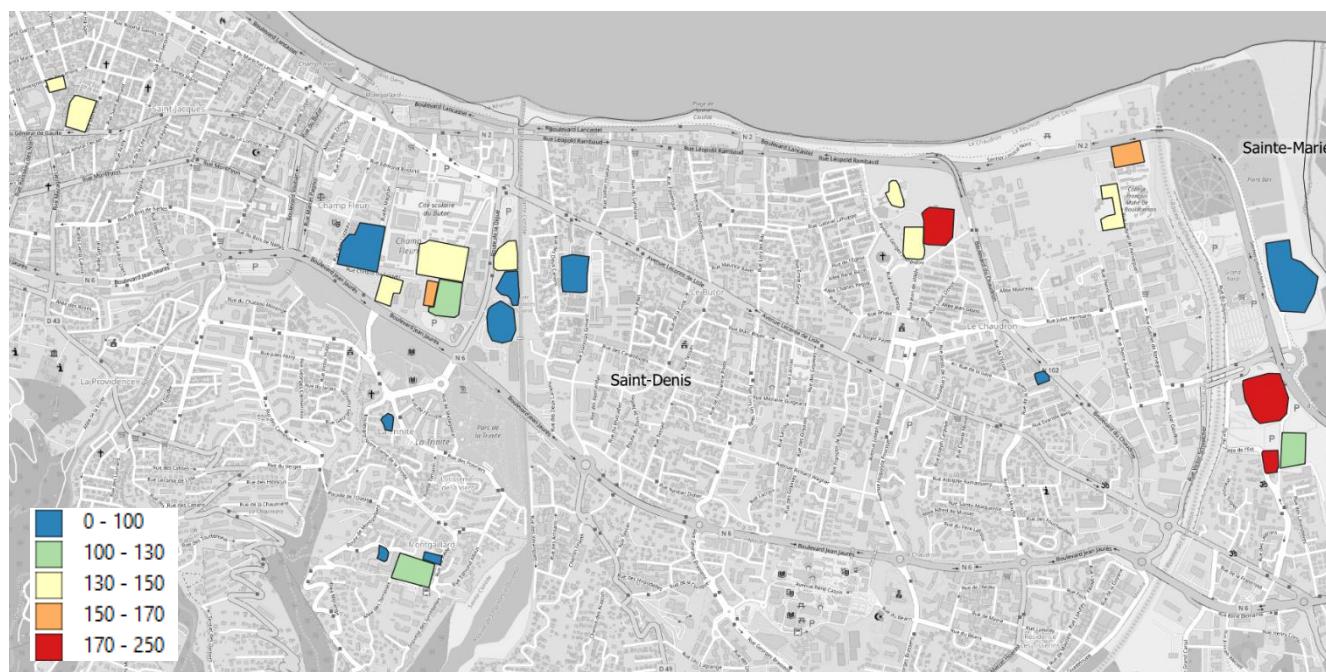
On peut le voir par exemple pour deux terrains de sport à La Possession (un « grand terrain de sport » et un « terrain multi-sports » dans la terminologie de l'IGN) :



Terrains de sport à La Possession pour lesquelles la radiance n'est pas contenue dans leur périmètre

Afin de mieux évaluer la contribution totale de la radiance pour les principaux terrains de sport, un relevé manuel a été réalisé visuellement en positionnant l'orthophotographie nocturne en transparence sur une couche « Google Satellite » et en repérant les terrains éclairés.

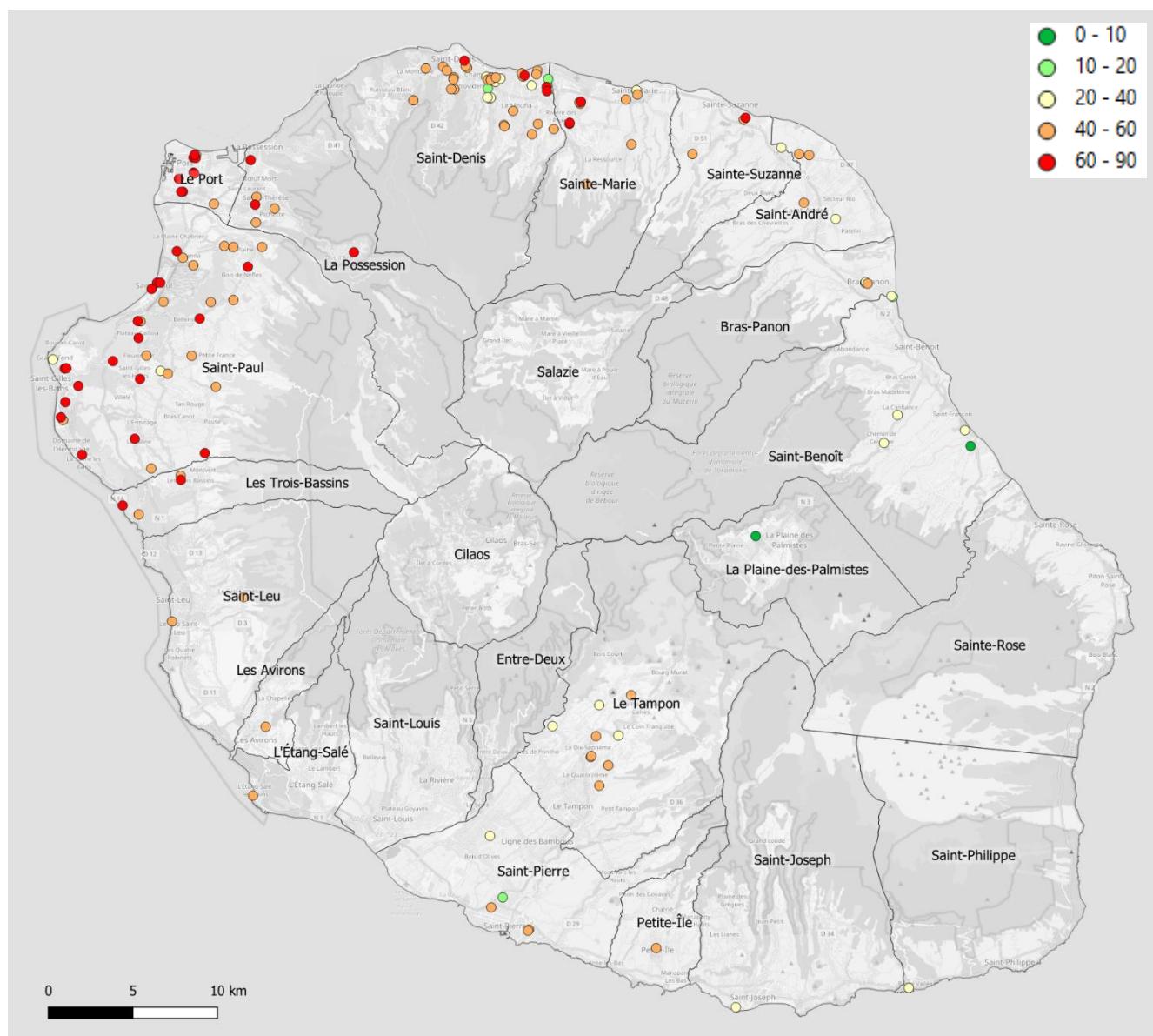
Des polygones ont été tracés autour des terrains pour englober toute la radiance (y compris les installations qui font partie des terrains mais pas les parkings à proximité). Tout comme pour le relevé IGN, la valeur moyenne de la radiance a été calculée pour chacune des parcelles identifiées. L'extrait de carte ci-dessous montre ce qui a été obtenu au centre de la commune de Saint-Denis (avec des codes couleur associés à des valeurs de radiance en unités relatives).



Terrains de sport relevés manuellement au centre de la commune de Saint-Denis

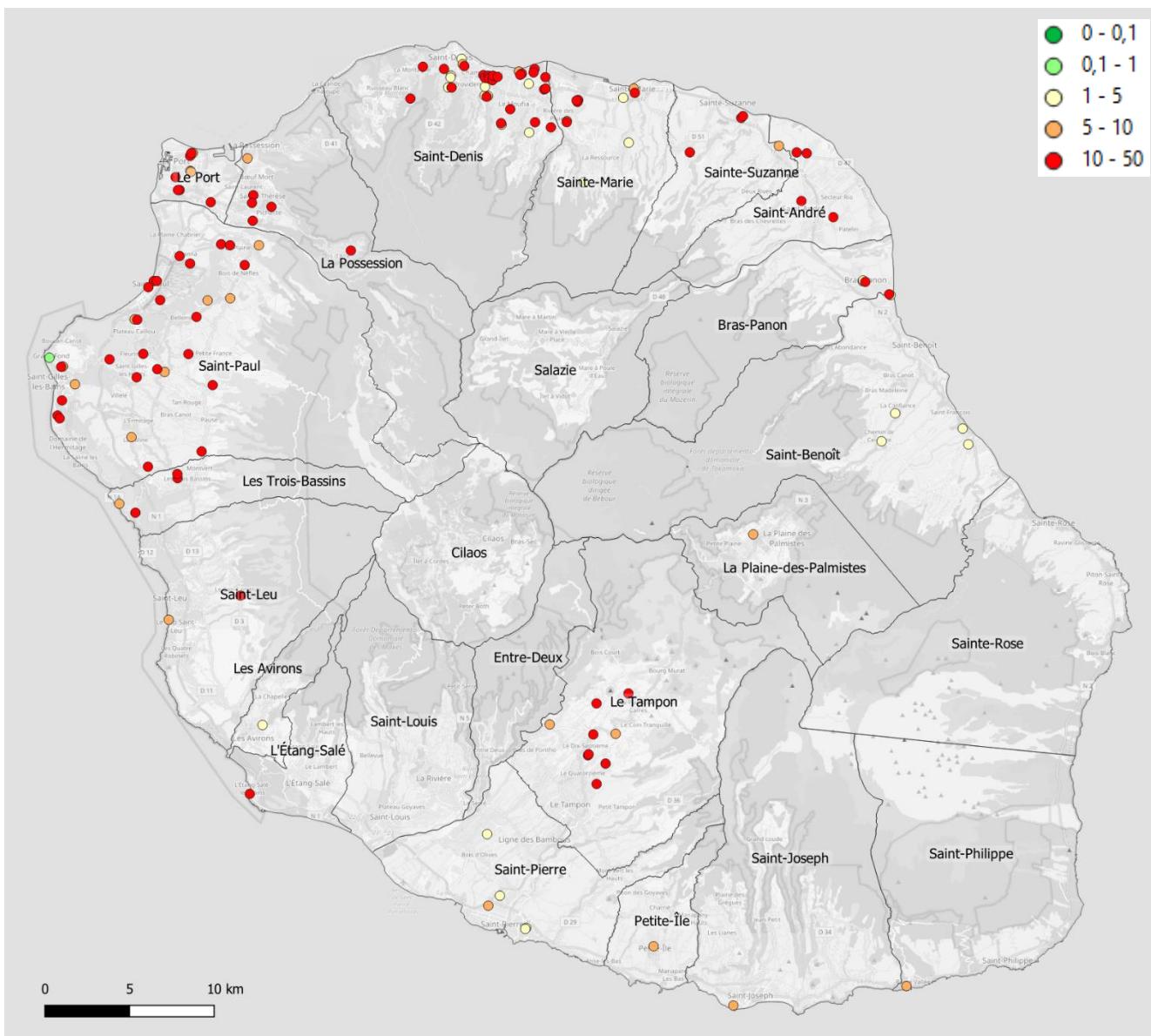
Ce relevé n'a pas la prétention d'être exhaustif mais il permet de prendre en compte l'essentiel de la radiance pour les terrains de sport les plus éclairés. Un total de 144 terrains de sport a été relevé sur l'ensemble de l'île, avec bien sûr le même biais potentiel lié au fait que les dates et les heures de passage pour la réalisation de l'orthophotographie nocturne ne sont pas homogènes sur tout le territoire de l'île. Il est à noter que ces 144 terrains relevés visuellement sont présents dans la base des 1186 terrains de la BD TOPO de l'IGN à quelques rares exceptions près.

La carte ci-contre montre les radiances moyennes des 144 terrains de sport exprimées en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$. Tout comme pour le relevé des terrains IGN, les plus fortes radiances sont observées sur les terrains au nord-ouest de l'île (Le Port, La Possession, Saint-Paul, les Trois-Bassins) et sur les communes au nord et nord-est (Saint-Denis, Sainte-Suzanne et Saint-André). Comme attendu, on voit apparaître les terrains de sport avec les plus fortes radiances puisque ces derniers ont été repérés visuellement. De plus, on a englobé des radiances en périphérie des terrains qui n'étaient pas prise en compte avec les contours IGN et qui sont souvent élevées. Il faut bien sûr prendre aussi en compte le fait que de nombreux terrains sont éteints, spécialement dans la partie sud.



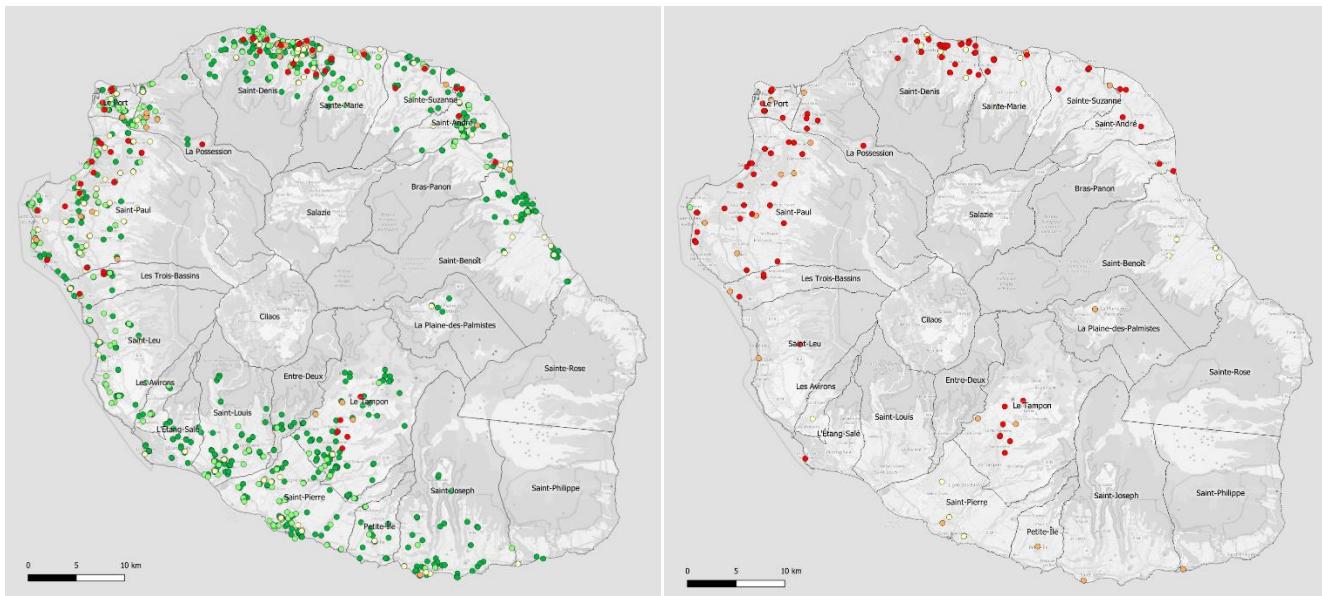
Radiances moyennes sur les contours de 144 terrains de sport relevés manuellement (en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$)

Comme dans la section précédente, on a ensuite calculé le flux associé à chacun des 144 terrains relevés manuellement. La carte ci-dessous montre le résultat obtenu avec les mêmes classes de flux que pour le relevé IGN.



Flux associés aux 144 terrains relevés manuellement (en Watts)

Sans surprise, la grande majorité des terrains possèdent des flux élevés. Les deux relevés de flux (à partir du relevé IGN et à partir du relevé manuel) sont mis en regard ci-dessous afin de pouvoir opérer une comparaison visuelle. Les résultats sont cohérents même si dans certains cas le relevé manuel fait apparaître des flux plus importants. Cela est lié au fait que l'on a pris en compte des sources de radiances aux abords des terrains eux-mêmes.

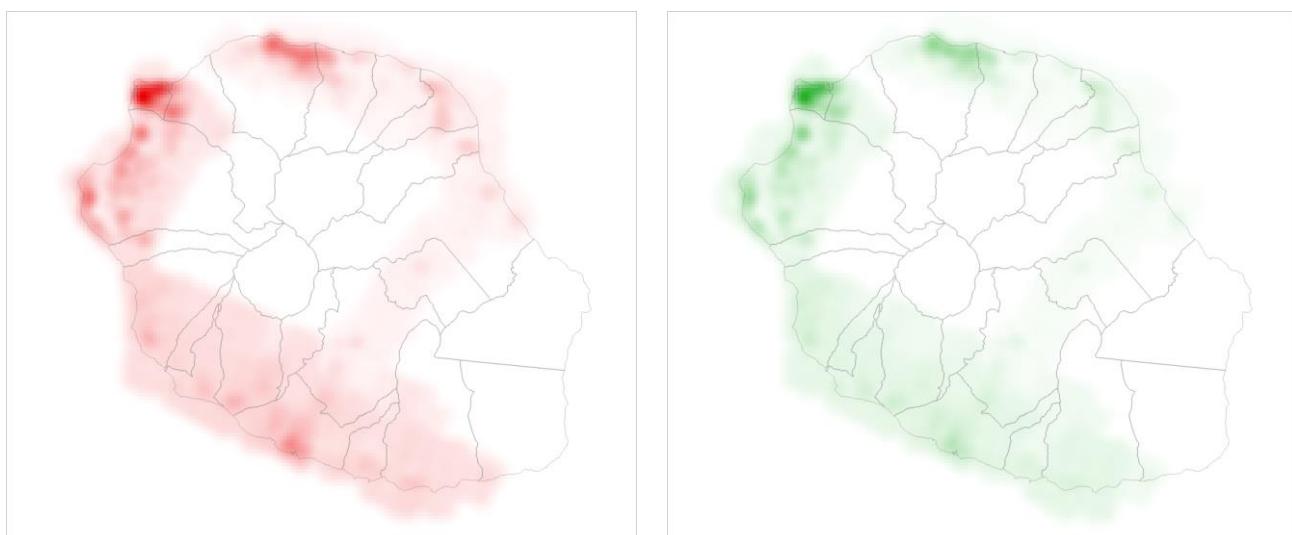


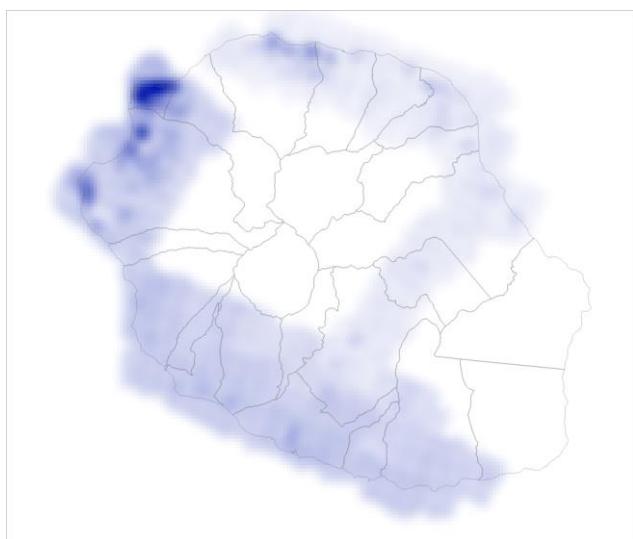
*Comparaison des flux déterminés à partir des contours IGN (à gauche)
et des contours relevés manuellement (à droite)*

3 Analyse spectrale de l'orthophotographie

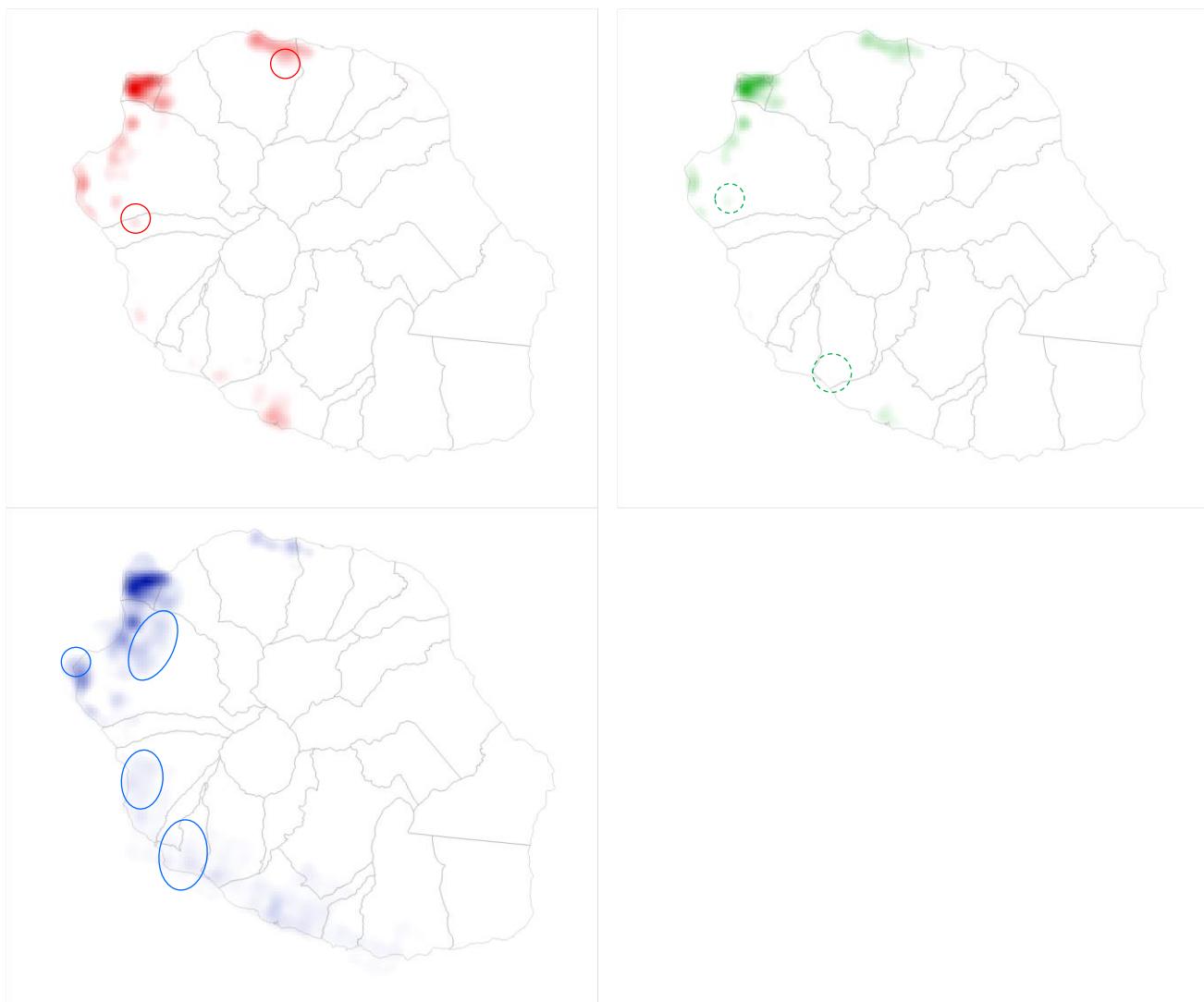
Une analyse spectrale de l'orthophotographie aérienne a été réalisée afin de déterminer si des différences de couleurs significatives à l'échelle de l'île pouvaient être détectées. Pour cela, les 3 canaux R, G et B ont été extraits de l'image couleur, rééchantillonnés avec un pas de 100 mètres puis diffusés sous forme de « heatmaps » de manière à pouvoir réaliser des comparaisons.

Les 3 cartes résultantes sont montrées ci-dessous. Il est difficile sur la base de ces images de déterminer de réelles différences dans la mesure où les niveaux associés à chacun des 3 canaux ne sont pas normalisés. De plus, l'orthophotographie est assez bruitée comme on peut le voir sur les images ci-dessous où l'on ne cherche pas à pousser le contraste (un niveau de fond est présent spécialement pour l'image dans le bleu).



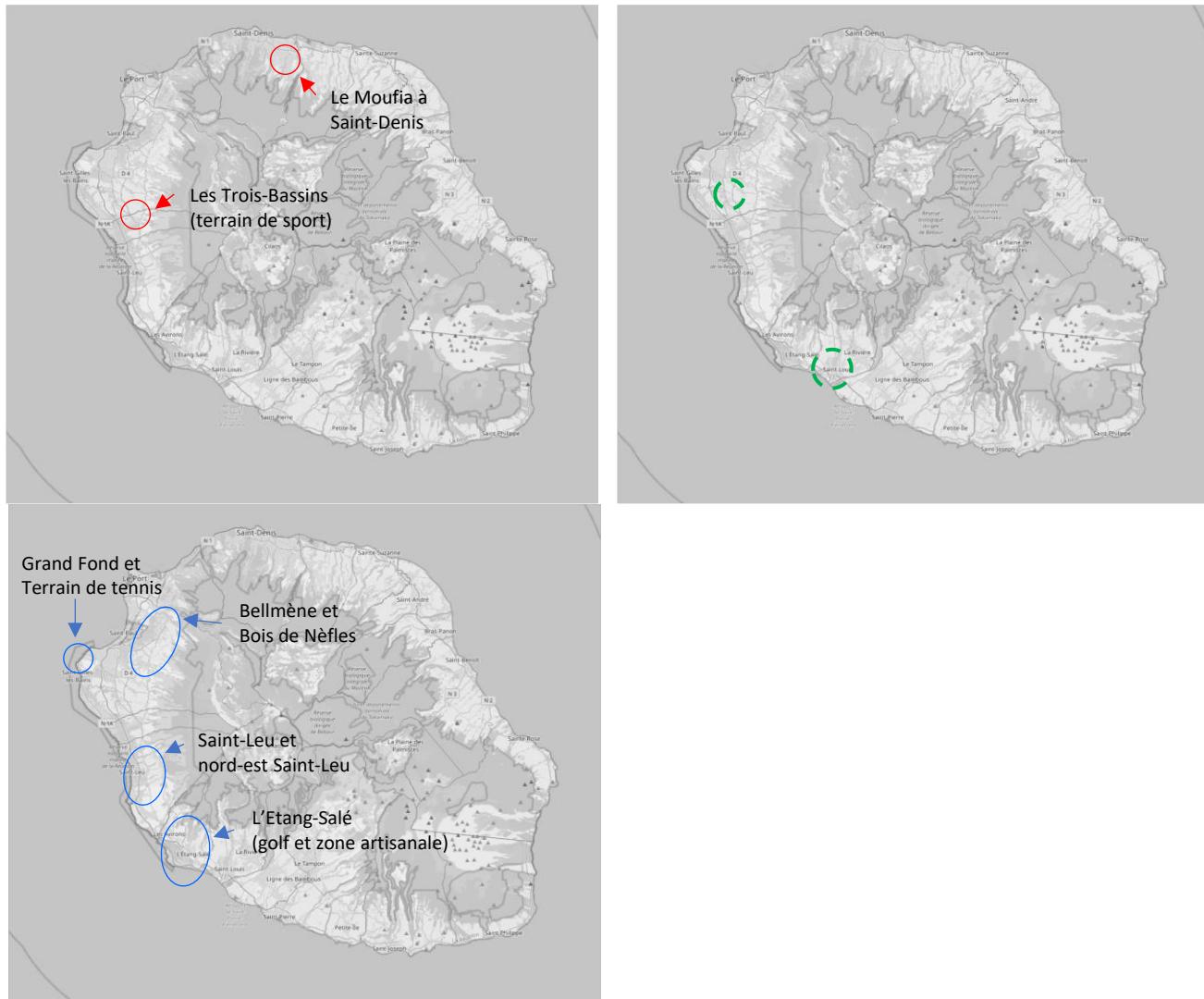


Afin de mieux identifier d'éventuelles différences entre les 3 canaux, le contraste a été poussé sur les 3 images et les principales différences ont été identifiées sur les cartes (en trait plein pour un excès de radiance sur le canal concerné et en trait pointillé pour un déficit de radiance).



Les cartes suivantes détaillent plus explicitement les zones où des différences significatives entre les 3 canaux de couleur ont pu être constatées. Cette analyse n'est toutefois pas réellement concluante du

fait de la qualité relativement faible de l'orthophotographie. On ne détecte pas par exemple sur la commune de Saint-André la plus forte densité d'éclairage public à base de systèmes LED dans le canal bleu alors que l'on s'attendrait à ce que ce soit le cas (même si ces dispositifs ont un ULR a priori plus faible que pour les autres types de lampe).



Afin de mieux identifier des différences, il conviendrait de réaliser une orthophotographie nocturne avec un instrument mieux calibré photométriquement et avec un niveau de bruit moins élevé pour pouvoir extraire des canaux RGB plus significatifs.

4 Evaluation des contributions à l'émission de lumière

Une information importante concernant l'émission de lumière d'origine anthropique concerne l'origine de cette dernière. La disponibilité de l'orthophotographie, ainsi que la connaissance de l'implantation des terrains de sport et la disponibilité des données de points lumineux d'éclairage public pour la plupart des communes de l'île, permet d'évaluer grossièrement les contributions à la pollution lumineuse de 3 catégories d'équipements :

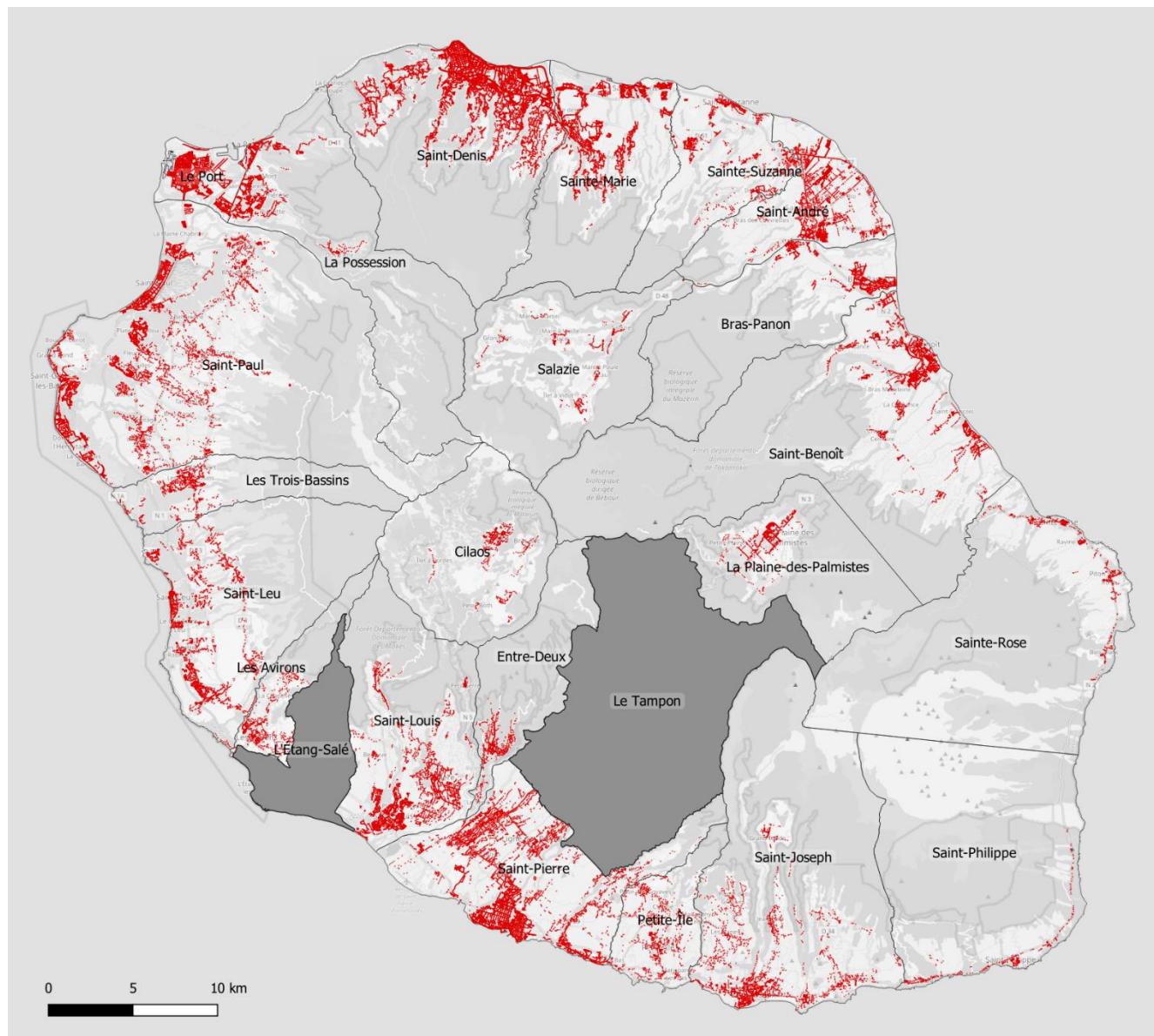
- Les points lumineux de l'éclairage public ;
- L'éclairage des terrains de sport ;

- L'éclairage d'origine privée.

Les paragraphes suivants décrivent la méthodologie utilisée pour évaluer les contributions de ces 3 types d'équipements.

4.1 Points lumineux d'éclairage public

On dispose pour l'île de la Réunion des points lumineux de 22 communes sur les 24 que comprend le territoire. Seuls manquent les points lumineux des communes de l'Étang-Salé et du Tampon (voir le rapport de la phase 1 du projet). Il y a un total de 75 020 points lumineux disponibles. La carte ci-dessous montre l'implantation des points lumineux d'éclairage public sur l'île avec les deux communes pour lesquelles on n'en dispose pas masquées.

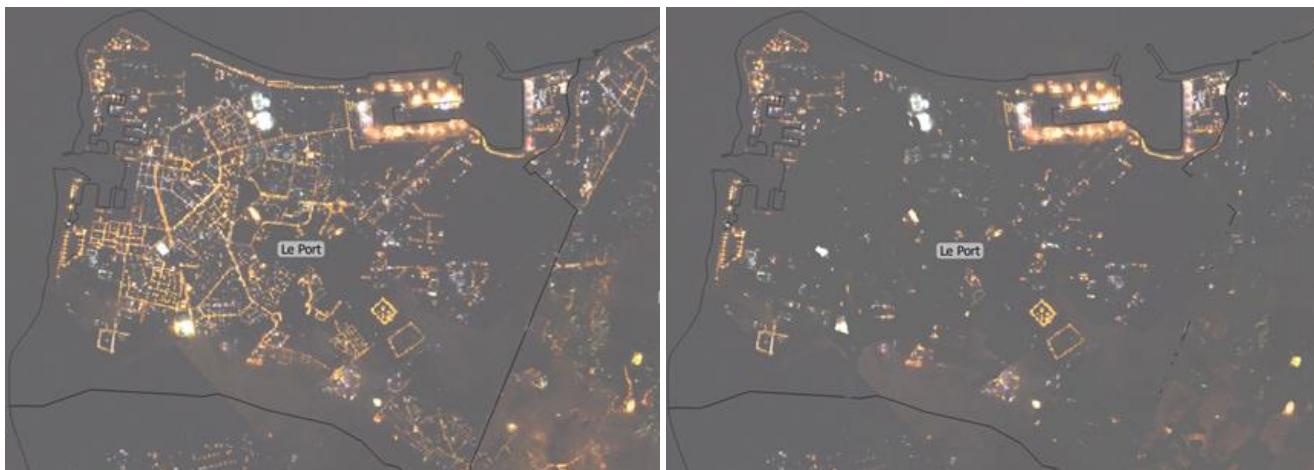


Les 75 020 points lumineux disponibles sur l'île de la Réunion

L'évaluation de la contribution des points lumineux d'éclairage public à l'émission de lumière dans l'environnement nocturne a été réalisée de la façon suivante :

1. Transformation de l'ensemble des points lumineux en une couche vectorielle en appliquant un « buffer » de rayon 25 mètres autour de chaque point lumineux. La valeur de ce buffer a été déterminée empiriquement de manière à recouvrir l'ensemble de la radiance des points lumineux visibles sur l'orthophotographie nocturne. De plus, l'orthophotographie n'est pas parfaitement calée sur toutes les zones du territoire et un buffer un peu large permet de minimiser les cas où la radiance des points lumineux n'est pas complètement couverte.
2. « Dissolution » de l'ensemble des disques recouvrant les points lumineux en une couche polygone pour créer un masque. Ce masque est transformé en un raster avec un pas de 10 mètres où un pixel vaut 1 s'il est sur l'empreinte d'un point lumineux et 0 s'il ne l'est pas.
3. Multiplication du raster de l'orthophotographie rééchantillonné avec un pas de 10 mètres et du masque des points lumineux créé dans l'étape précédente. On obtient alors en sortie un raster où les pixels non nuls se trouvent dans la zone d'influence d'un point lumineux. L'orthophotographie avec un pas de 10 mètres a été traitée au préalable pour essayer de supprimer le bruit de l'image dans les zones peu ou pas éclairées. Dans le raster résultant, les valeurs des pixels de radiance sont exprimées en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$.
4. Calcul de la somme de la radiance de tous les pixels du raster créé dans l'étape précédente. Le total représente la contribution des points lumineux d'éclairage public à l'émission de lumière dans l'environnement nocturne.

Les deux figures ci-dessous montrent l'orthophotographie en couleur de la zone du Port avec à gauche une vue sans application du masque des points lumineux d'éclairage public et à droite une vue avec application du masque.



Application du masque des points lumineux d'éclairage public sur la zone du Port

Les statistiques de la couche raster résultante dans l'étape 3 sont les suivantes :

- Surface totale des pixels de radiance associés aux points lumineux : 88 191 875 m^2 soit environ 88 km^2 .
- Nombre de pixels associés aux points lumineux : 881 919
- Somme de la radiance de tous les pixels : 2 377 877 $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$
- Radiance moyenne des pixels associés aux points lumineux : 2,7 $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$

Comme cela a été dit au début de cette section, ces statistiques n'intègrent pas les surfaces et la radiance associées aux points lumineux des communes de l'Étang-Salé et du Tampon (en effet ces données ne sont pas disponibles).

4.2 Eclairage des terrains de sport

En ce qui concerne la contribution des terrains de sport, une méthodologie similaire à celle pour les points lumineux est adoptée :

1. Utilisation de la couche des terrains de sport de l'IGN et élargissement des terrains avec un buffer de 25 mètres. On utilise cette approche pour inclure autant que faire se peut la radiance autour des stades.
2. « Dissolution » de l'ensemble des polygones qui constituent les terrains élargis pour créer un masque. Ce masque est transformé en un raster avec un pas de 10 mètres où un pixel vaut 1 s'il est sur l'empreinte d'un terrain de sport et 0 s'il ne l'est pas.
3. Modification du masque des terrains de sport pour éliminer les zones qui sont déjà couvertes par le masque des points lumineux. En effet, on ne veut pas comptabiliser des pixels 2 fois sachant qu'il peut y avoir des recouvrements entre ces deux masques.
4. Multiplication du raster de l'orthophotographie rééchantillonné avec un pas de 10 mètres et du masque des terrains de sport créé dans l'étape précédente. On obtient donc en sortie un raster où les pixels non nuls se trouvent dans la zone d'influence des terrains de sport. Les valeurs des pixels de radiance sont exprimées en $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$.
5. Calcul de la somme de la radiance de tous les pixels du raster créé dans l'étape précédente. Le total représente la contribution des terrains de sport à l'émission de lumière dans l'environnement nocturne.

Les statistiques de la couche raster résultante dans l'étape 4 sont les suivantes :

- Surface totale des pixels de radiance associés aux terrains de sport : 6 748 300 m^2 soit environ 6,7 km^2 .
- Nombre de pixels associés aux terrains de sport : 67 483
- Somme de la radiance de tous les pixels : 709 941 $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$
- Radiance moyenne des pixels associés aux terrains de sport : 10,5 $nW.cm^{-2}.sr^{-1}$

4.3 Eclairage privé

On considère ici que l'éclairage privé représente tout ce qui n'est pas lié aux points lumineux d'éclairage public et à l'éclairage des terrains de sport. C'est bien sûr une hypothèse simplificatrice, mais il est difficile de faire plus précis avec les données disponibles.

Le calcul de la somme des radiances de l'éclairage privé se fait donc simplement en prenant tous les pixels de l'orthophotographie nocturne et en enlevant ceux qui appartiennent aux masques des points lumineux d'éclairage public et des terrains de sport.

Les statistiques obtenues sont alors les suivantes :

- Surface totale des pixels de radiance associés à l'éclairage privé : 7 663 379 m² soit environ 7,7 km².
- Nombre de pixels associés à l'éclairage privé : 76 634
- Somme de la radiance de tous les pixels : 2 101 752 nW.cm⁻².sr⁻¹
- Radiance moyenne des pixels associés à l'éclairage privé : 27,4 nW.cm⁻².sr⁻¹

4.4 Analyse des contributions respectives

Le tableau suivant résume les contributions des différents types d'éclairage.

Type d'éclairage	Surface des pixels de radiance (km ²)	Nombre de pixels de radiance	Radiance moyenne par pixel de 10 m ² (en nW.cm ⁻² .sr ⁻¹)	Somme de la radiance (en nW.cm ⁻² .sr ⁻¹)	Contribution en %
Points lumineux d'éclairage public	88	881 919	2,7	2 377 877	45,8%
Terrains de sport	6,7	67 483	10,5	709 941	13,7%
Eclairage privé	7,7	76 634	27,4	2 101 752	40,5%

Ces statistiques n'intègrent pas les surfaces et les radiances associées aux points lumineux des communes de l'Étang-Salé et du Tampon (en effet les données de points lumineux ne sont pas disponibles pour ces deux communes).

Contrairement à ce que l'on pourrait croire intuitivement en regardant l'orthophotographie nocturne, les terrains de sport éclairés représentent moins de 15% de la radiance émise vers le ciel, mais ils contribuent tout de même de manière notable aux nuisances lumineuses émises dans l'environnement nocturne de l'île (avec un pourcentage plus élevé qu'en métropole). La plus grande partie de la radiance est émise par l'éclairage public avec plus de 45% et l'éclairage privé représente environ 40%. Il est à noter que la radiance moyenne des pixels liés à l'éclairage privé est beaucoup plus élevée que celle de l'éclairage public et des terrains de sport. Cela semble indiquer que l'éclairage privé est peu respectueux de l'environnement sur l'île de la Réunion avec une forte émission au-dessus de l'horizontale.

Ce résultat est bien sûr approximatif puisque des hypothèses simplificatrices ont été prises dans le processus d'attribution des pixels de radiance aux différents types d'éclairage. Il n'en reste pas moins que cette répartition des contributions à la pollution lumineuse des différents types d'éclairage, même si elle est approximative, est très probablement assez proche de la réalité du terrain.

5 Simulation de la pollution lumineuse

L'orthophotographie aérienne nocturne fournie dans le cadre du projet contient des données de radiance et il est donc possible de réaliser des simulations de la pollution lumineuse à partir de ces données en utilisant le logiciel **Otus** développé par DarkSkyLab (voir le rapport concernant la première phase du projet).

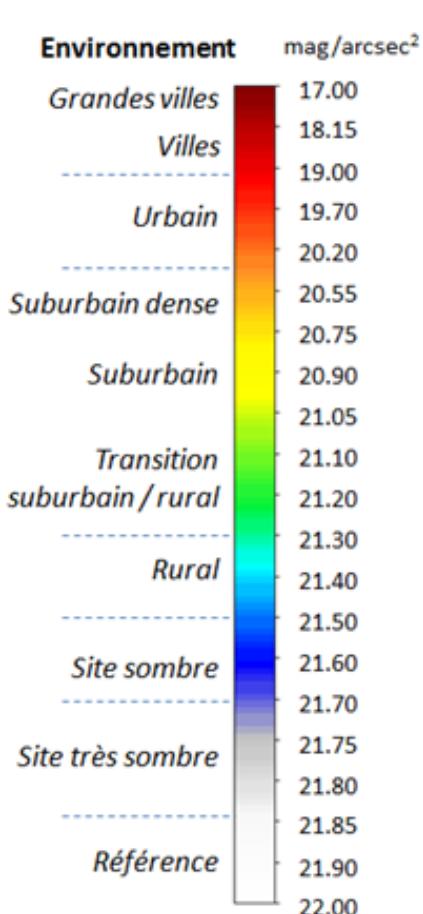
Les données de l'orthophotographie n'étant pas calibrées (elles sont simplement livrées sous forme d'une image couleur avec les pixels de radiance codés sur 8 bits pour chaque canal RGB), les simulations ne peuvent donc livrer qu'une représentation approximée de la pollution lumineuse une fois

que l'on a réalisé une calibration grossière à partir de données de radiance satellite (voir la section 2.1). Toutefois, l'important est ici de pouvoir comparer des scénarios d'extinction entre eux, et le fait que les radiances ne soient pas bien calibrées n'est donc pas un problème critique.

De plus, l'orthophotographie est incomplète puisqu'elle ne couvre pas les communes du centre et du sud-est de l'île (Salazie, Cilaos, Sainte-Rose et Saint-Philippe). Les radiances au centre et au sud de l'île sont donc incomplètes, ce qui est une raison supplémentaire pour ne pas considérer les résultats de ces simulations comme absous mais plutôt comme relatifs à des fins de comparaison entre les différents scénarios. Il est à noter que les communes non couvertes sont plutôt isolées et situées au cœur du parc national, et leur impact sur la biodiversité nocturne locale est donc certainement assez important.

Deux jeux de scénarios ont été simulés : un premier où l'on applique des extinctions à l'ensemble de l'île (tout du moins aux communes pour lesquelles on dispose des données de l'orthophotographie nocturne et des données de points lumineux), et un second où l'on applique des extinctions uniquement pour les communes dont on sait qu'elles pratiquent aujourd'hui des extinctions. Les sections suivantes décrivent la méthodologie et les résultats obtenus pour les deux jeux de scénarios après une brève introduction sur la représentation de la pollution lumineuse et la présentation des résultats de la simulation réalisée à partir de l'orthophotographie sans extinction.

5.1 Représentation de la pollution lumineuse



L'échelle ci-contre montre à quoi correspondent les différentes couleurs utilisées dans les cartes de pollution lumineuse fournies dans ce rapport.

La brillance du fond de ciel nocturne est appelée NSB (*Night Sky Brightness* en anglais) et elle est exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré (mag/arcsec²). Cette unité est celle d'une luminance et il s'agit d'une mesure logarithmique dérivée de la magnitude photométrique largement utilisée en astronomie (inspirée de la vision humaine). Sur cette échelle, les valeurs les plus élevées correspondent aux brillances les plus faibles.

L'échelle de couleur montre la correspondance entre les valeurs de NSB et les environnements typiques dans lesquelles elles sont rencontrées. On notera sur cette échelle qu'une petite variation de la valeur de NSB a de plus grands effets dans la zone de faibles brillances de ciel (sites sombres) que dans la zone de fortes brillances (ciels pollués).

Les couleurs utilisées sur l'échelle sont représentatives de l'indice de qualité du ciel au zénith. Elles vont du rouge foncé (emplacement les plus pollués) au blanc (lieux sans aucune pollution lumineuse) en passant successivement par le rouge, l'orange, le jaune, le vert, le cyan, le bleu et le gris.

Dans le cadre des simulations à partir de l'orthophotographie, le fait que toutes les zones de l'île de soient pas couvertes et que l'orthophotographie ne soit pas finement calibrée ne permet pas de

réaliser une interprétation absolue des niveaux de luminance obtenus. L'échelle de couleur montrée ci-dessous et les règles d'interprétation décrites plus loin dans cette section ne sont donc fournies qu'à titre indicatif pour pouvoir réaliser des comparaisons relatives entre les cartes issues des différents scénarios.

Une façon plus simple d'interpréter les cartes de pollution lumineuse est de lier la couleur utilisée en chaque point d'une carte au nombre d'étoiles qui seraient visibles à l'œil nu par conditions de ciel clair en ce point.

Le tableau ci-contre montre la correspondance approximative que l'on peut établir entre les couleurs utilisées dans les cartes et le nombre d'étoiles visibles à l'œil nu ainsi que la magnitude des étoiles les plus faibles que l'on pourrait apercevoir*.

* Depuis un point d'observation situé à la latitude de Toulouse dans la nuit du 27 mars 2017 (au-dessus de 10° de hauteur et en étant protégé d'un éclairage direct)

Couleur Otus	Nombre d'étoiles	Magnitude limite
	> 6700	≥ 7
	> 3800	≥ 6.5
2170	2170	6
1180	1180	5.5
950	950	5.25
660	660	5
520	520	4.75
340	340	4.5
220	220	4.25
190	190	4
≤ 90	≤ 90	≤ 3.5

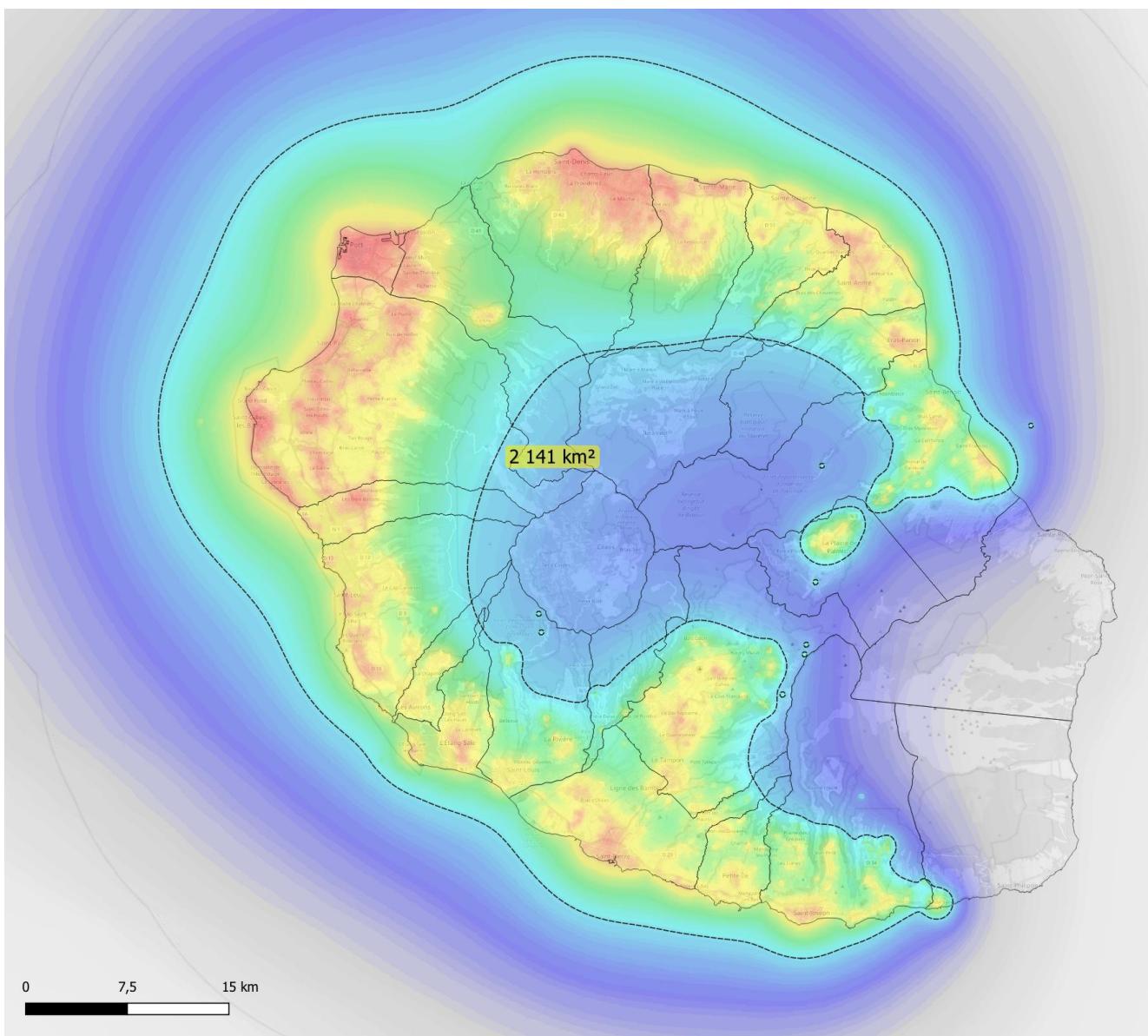
Enfin, on peut aussi relier la couleur utilisée dans les cartes de pollution lumineuse à la visibilité de la Voie lactée par temps clair et sans présence de la Lune. Le tableau ci-dessous montre la définition de 8 classes de pression de la lumière pour lesquelles on caractérise la visibilité de la Voie lactée.

Classes de pression de la lumière	Plage de NSB (luminance zénithale en mag/arcsec ²)	Environnement typique	Visibilité de la Voie lactée par ciel clair
1	≤ 19.50	Grandes villes	Invisible
2	> 19.50 et ≤ 20.30	Urbain	Presque invisible
3	> 20.30 et ≤ 20.75	Suburbain dense	A peine visible
4	> 20.75 et ≤ 21.00	Suburbain	Visible au zénith
5	> 21.00 et ≤ 21.25	Transition suburbain / rural	Affaiblie à l'horizon
6	> 21.25 et ≤ 21.50	Rural	Quelques détails
7	> 21.50 et ≤ 21.70	Site sombre	Nombreux détails
8	> 21.70	Site très sombre	Très détaillée

5.2 Simulation de l'orthophotographie sans extinctions

La première chose à faire est de réaliser une simulation à partir de l'orthophotographie sans appliquer aucune extinction de radiance sur cette dernière. Ce premier scénario sert de référence pour réaliser des comparaisons avec les scénarios suivants. A l'issue de cette simulation, un isocontour à 21,4 mag/arcsec² a été tracé et sa surface a été calculée. C'est cette surface qui servira de métrique pour comparer les différents scénarios et évaluer leurs bénéfices. La valeur de 21,4 mag/arcsec² est une valeur représentative d'un ciel qui commence à être de bonne qualité (il s'agit d'un ciel typiquement rural), mais, une fois de plus, dans le cadre de ce projet, le fait que toutes les zones de l'île de soient pas couvertes et que l'orthophotographie ne soit pas rigoureusement calibrée ne permet pas de réaliser une interprétation absolue des niveaux de luminance obtenus.

La carte ci-dessous montre le résultat de la simulation réalisée sans aucune modification appliquée à l'orthophotographie nocturne monochrome sommairement calibrée à partir de radiance satellite. L'orthophotographie a été rééchantillonnée avec un pas de 10 mètres et a été traitée au préalable pour essayer de supprimer autant que faire se peut le bruit de l'image dans les zones peu ou pas éclairées.

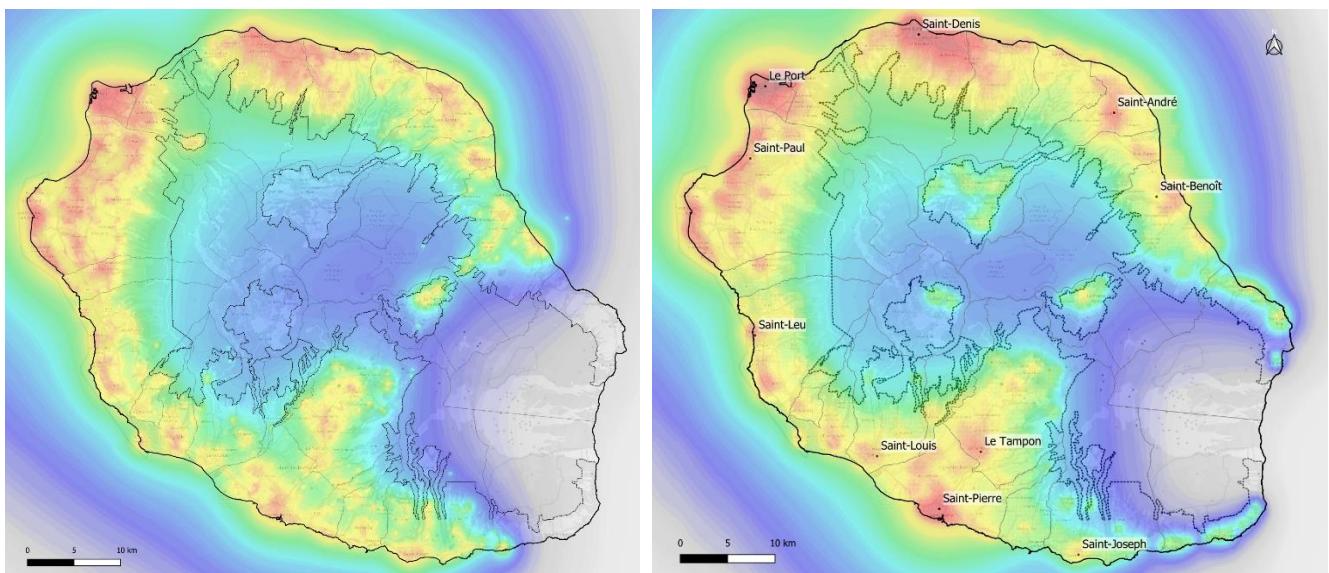


Simulation de la pollution lumineuse en utilisant l'orthophotographie nocturne. La surface de l'isocontour à 21,4 mag/arcsec² tracé sur la carte en pointillés est indiquée sur la figure.

A titre de comparaison, il est intéressant de visualiser le résultat de la simulation à partir de l'orthophotographie avec celui issue d'une simulation à partir de données de radiance satellite VIIRS-DNB (composite synthétique annuel 2019) en cœur de nuit.

Les 2 figures ci-dessous permettent de comparer visuellement les résultats de ces deux simulations. On peut constater que plusieurs zones de pollution manquent dans la carte de gauche du fait de la couverture incomplète de l'orthophotographie. L'absence de ces zones de radiance baisse aussi globalement les niveaux sur l'ensemble de l'île. Les niveaux sont aussi un peu moins élevés sur la simulation issue de l'orthophotographie du fait d'une calibration moins précise que pour les données satellite. Mais on peut toutefois dire que globalement les résultats de simulation sont tout à fait

similaires. De plus, la résolution de la carte de pollution lumineuse issue de l'orthophotographie est bien meilleure du fait de la petite taille des pixels de radiance.



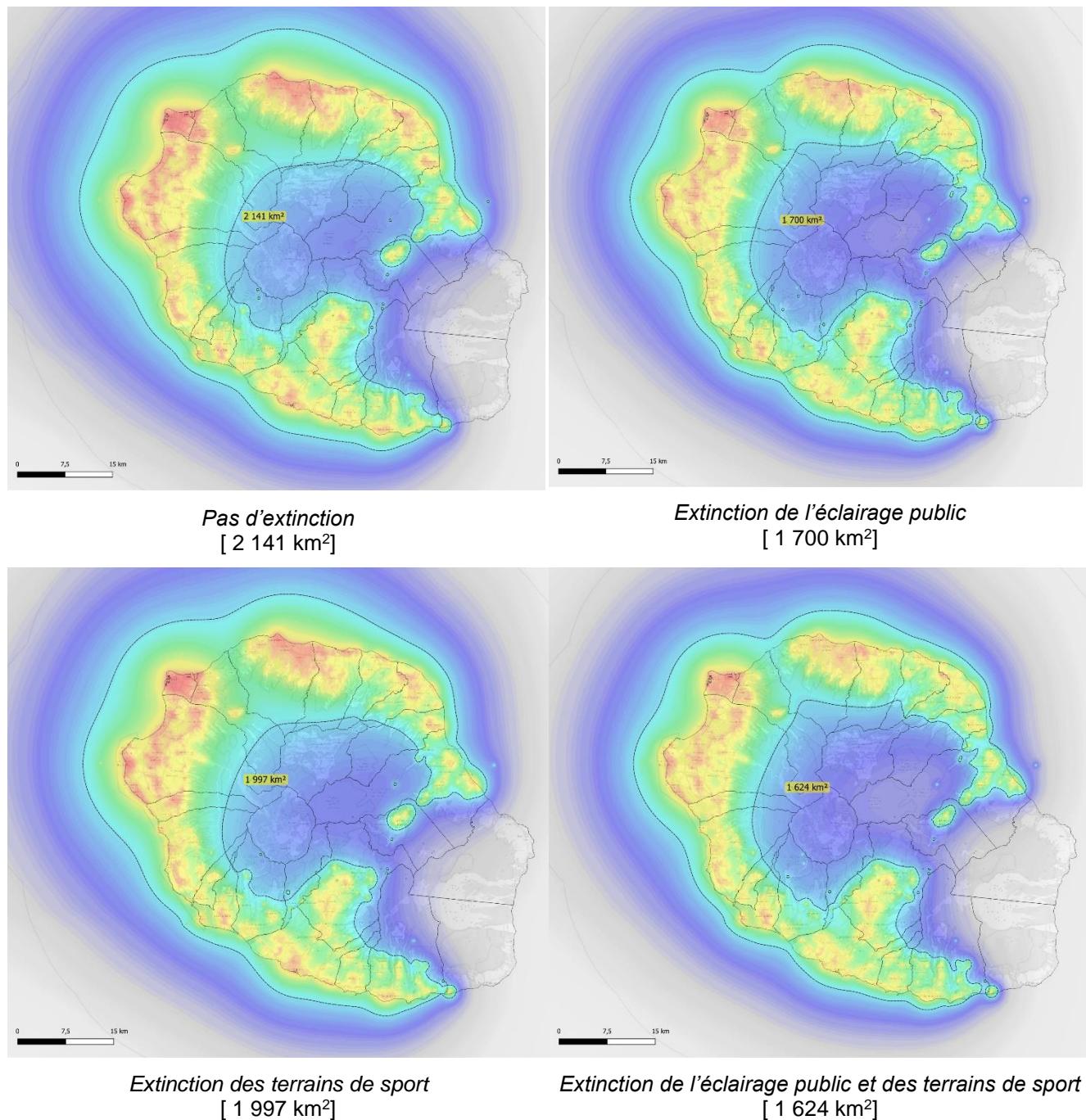
Simulation à partir de l'orthophotographie (à gauche) et à partir des radiance satellite (à droite)

5.3 Scénarios d'extinction sur l'ensemble de l'orthophotographie

Trois scénarios de simulation ont été mis en œuvre avec différentes extinctions appliquées à l'ensemble de l'orthophotographie :

- Un premier scénario a été mis en œuvre en simulant une extinction de tous les points lumineux d'éclairage public. On a utilisé pour cela le masque des points lumineux présenté dans la section 4.1.
- Un deuxième scénario a été simulé où l'on éteint cette fois-ci l'ensemble des terrains de sport (sur la base du relevé de l'IGN). On a utilisé pour cela le masque présenté dans la section 4.2.
- Enfin un troisième scénario a été simulé en appliquant à la fois les extinctions de tous les points lumineux d'éclairage public ainsi que sur les terrains de sport.

Pour chacun de ces 3 scénarios on a calculé la surface de l'isocontour à 21,4 mag/arcsec². Les résultats de simulation de ces 3 scénarios sont présentés ci-dessous avec en première position un rappel du résultat de simulation sans aucune extinction.



La comparaison des surfaces des isocontours montre que le bénéfice de l'extinction des terrains de sport est relativement modeste (de l'ordre de 7%). Par contre, l'extinction des points lumineux d'éclairage public et des terrains de sport produit une forte amélioration avec une réduction de presque 25% de la surface de l'isocontour.

Le tableau ci-dessous résume les bénéfices attendus de l'extinction des points lumineux d'éclairage public et des terrains de sport.

Type d'extinction	Surface de l'isocontour (km ²)	Bénéfice (%)
Pas d'extinction	2141	
Extinction de l'éclairage public	1700	21%
Extinction des terrains de sport	1997	7%
Extinction de l'éclairage public et des terrains de sport	1624	24%

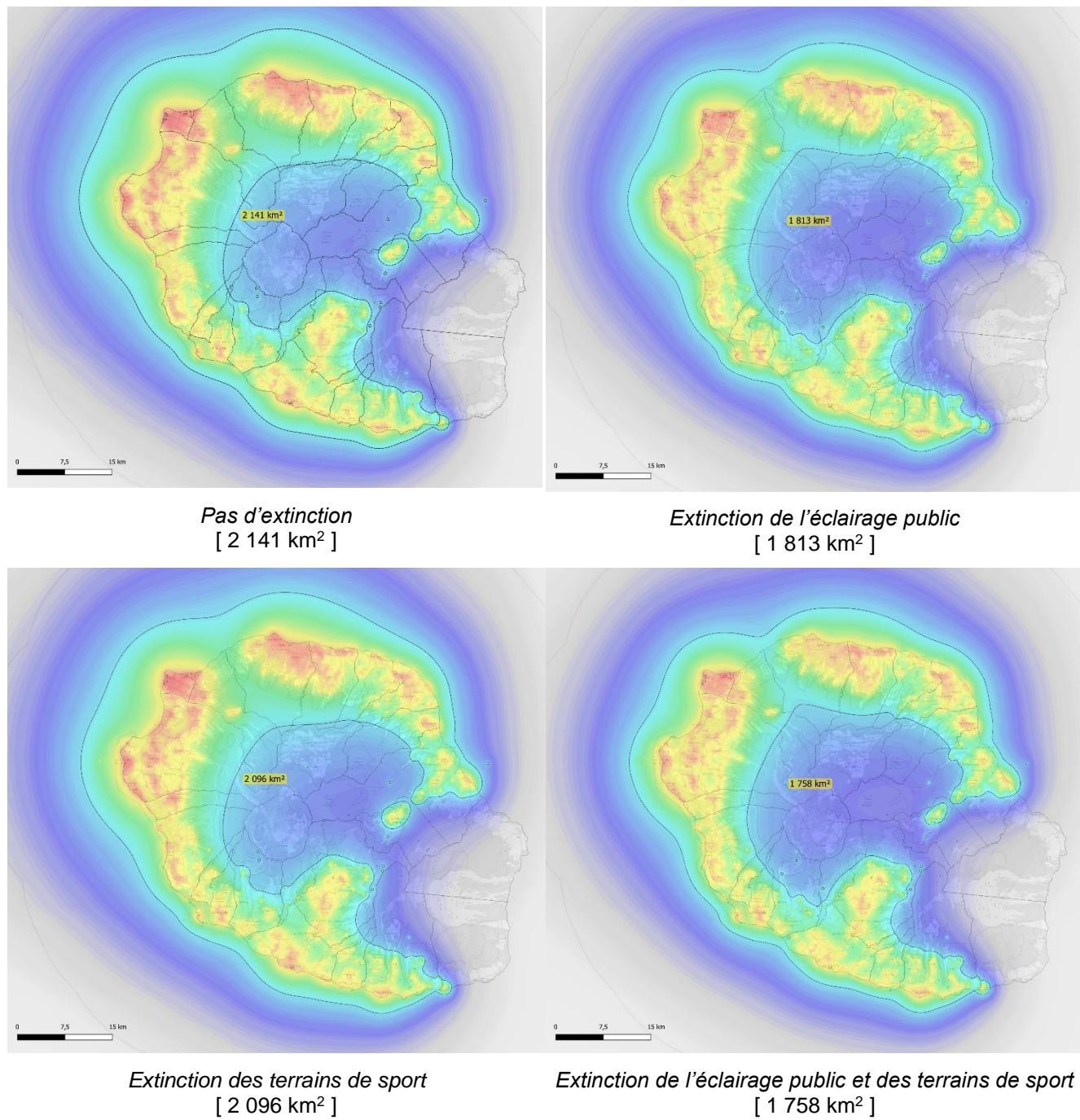
5.4 Scénarios d'extinction sur 16 communes

Un certain nombre de communes pratiquent déjà l'extinction sur l'île de la Réunion, que ce soit des extinctions en cœur de nuit sur toute la durée de l'année ou bien uniquement au mois d'avril durant la période de migrations des Pétrels de Barau. La carte ci-dessous montre l'orthophotographie ainsi que les 16 communes qui pratiquent l'extinction sur fond vert. Les 8 communes non engagées dans l'extinction sont représentées en beige. De plus, les deux communes pour lesquelles on ne dispose pas des points lumineux sont hachurées (pour ces deux communes on ne peut pas « éteindre » les points lumineux d'éclairage public dans les scénarios d'extinction).



Orthophotographie avec les communes qui pratiquent des formes d'extinction (en vert) et les communes qui ne pratiquent pas l'extinction (en beige). Les communes pour lesquelles on ne dispose pas des points lumineux sont hachurées.

Les 3 scénarios présentés dans la section précédente ont été rejoués mais cette fois-ci en limitant les extinctions aux communes qui pratiquent déjà une forme d'extinction. Les cartes ci-dessous montrent les résultats de simulation obtenus ainsi que les surfaces de l'isocontour à 21,4 mag/arcsec².



Le tableau ci-dessous résume les bénéfices obtenus dans ce second jeu de scénarios d'extinction. Les bénéfices obtenus dans le premier jeu de scénarios sont rappelés dans la dernière colonne.

Type d'extinction	Surface de l'isocontour (km ²)	Bénéfice jeu 2 (%)	Bénéfice jeu 1 (%)
Pas d'extinction	2 141		
Extinction de l'éclairage public	1 813	15%	21%
Extinction des terrains de sport	2 096	2%	7%
Extinction de l'éclairage public et des terrains de sport	1 758	18%	24%

Les bénéfices obtenus sont significativement inférieurs à ceux obtenus dans le premier jeu de scénarios où l'on pratiquait l'extinction sur toutes les communes de l'île (dans la mesure de la disponibilité des données). Cela est lié au fait que les surfaces des isocontours sont supérieures puisque qu'un nombre moindre de communes pratiquent l'extinction dans ce second jeu de scénarios. Les bénéfices sont donc plus limités.

6 Conclusion

Cette étude a permis de montrer que l'orthophotographie est un excellent moyen d'analyser la pollution lumineuse sur un territoire et d'évaluer ses impacts. La résolution élevée des données permet en particulier de d'avoir une bien meilleure compréhension des sources de nuisance lumineuses qu'avec des données satellite à faible résolution.

Les résultats exposés dans ce rapport montrent que l'éclairage des terrains de sport a une contribution de l'ordre d'une quinzaine de pourcents au niveau des nuisances lumineuses produites sur le territoire. Les principales contributions viennent des points lumineux d'éclairage public (de l'ordre de 45%) et des sources d'origine privée (de l'ordre de 40%).

Une analyse plus détaillée et plus précise aurait pu être réalisée avec des données d'orthophotographie complètes sur toute l'île, moins bruitées et mieux calibrées, mais les données fournies ont permis malgré tout d'estimer de manière assez fiable les contributions de l'éclairage public, des terrains de sport et de l'éclairage privé.

Les simulations de la pollution lumineuse obtenues selon différents scénarios d'extinction montrent que la généralisation des pratiques d'extinction de l'éclairage public et des terrains de sport à l'ensemble des communes de l'île permettrait une réduction de 25% de l'impact de la pollution lumineuse (en termes de surface impactée en deçà du seuil de 21,4mag/arcsec²). Cependant, un effort de sensibilisation est également fondamental afin de réduire l'impact des éclairages privés qui, avec leurs radiances élevées, contribuent fortement à la pollution lumineuse diffusée sur la plus grande partie de l'île.