



UNION EUROPÉENNE

L'opération IPAMAC « Trame noire - phase 1 » est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage dans le Massif central avec le fonds européen de développement régional.

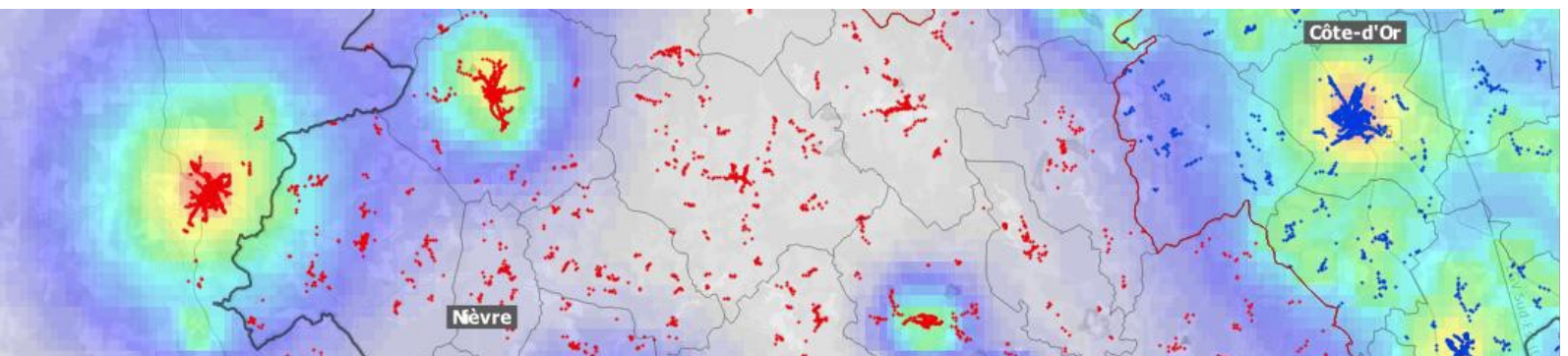


**AGENCE
NATIONALE
DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**
Commissariat du Massif central



Parc naturel régional du Morvan

Etat des lieux de la pollution lumineuse sur 6 Parcs naturels du Massif central



Rapport final

14 décembre 2020

Table des matières

1	Introduction	3
2	Analyse des points lumineux.....	4
	2.1 Données fournies	4
	2.2 Statistiques sur les points lumineux du PNR du Morvan.....	5
	2.2.1 Types de lampe	5
	2.2.2 Puissances	21
	2.3 Inventaire des points lumineux	24
3	Analyse des extinctions	26
4	Analyse des mesures de qualité de ciel	36
	4.1 Le système Ninox.....	36
	4.2 Définition de la brillance du fond de ciel	36
	4.3 Interprétation des courbes Ninox.....	36
	4.3.1 Courbes unitaires.....	37
	4.3.2 Influence de la Lune.....	37
	4.3.3 Analyse statistique des mesures Ninox.....	38
	4.4 Mesures réalisées sur le terrain	40
	4.5 Diagrammes pour les différents sites	47
	4.5.1 Histogrammes de densité	47
	4.5.2 Histogrammes de magnitude	51
	4.6 NSB en cœur de nuit.....	55
	4.7 Meilleures nuits sur certains sites.....	59
5	Simulation de la pollution lumineuse	60
	5.1 Simulation en cœur de nuit.....	61
	5.2 Simulation en extrémité de nuit	63
6	Activités complémentaires	69
	6.1 Positionnement d'une zone cœur de RICE.....	69
	6.2 Inventaire technique des points lumineux au format IDA	73
	6.3 Contribution d'Autun à la pollution lumineuse sur Glux-en-Glenne	76
7	Conclusion	78

1 Introduction

Dans le cadre du projet IPAMAC « *Etat des lieux de la pollution lumineuse sur 6 Parcs naturels du Massif central* », ce rapport a pour objectif de fournir les résultats finaux concernant les travaux d'étude de la pollution lumineuse sur le territoire du **Parc naturel régional du Morvan**. Ces travaux concernent spécifiquement :

- La collecte des données de points lumineux qui a pu être réalisée au niveau des différents départements sur l'empreinte du Parc naturel régional (Côte-d'Or, Nièvre, Saône-et-Loire et Yonne) et les statistiques et enseignements qui ont été produits sur cette base ;
- L'analyse des très nombreuses extinctions à partir des données de radiance satellite sur le territoire du Parc naturel régional ;
- Les résultats des mesures de luminance de ciel réalisées au cours de la campagne sur le terrain avec les systèmes de mesure Ninox fournis par DarkSkyLab ;
- Les résultats de simulation de la pollution lumineuse en utilisant les données de points lumineux fournis dans le cadre du projet ;
- Les analyses complémentaires qui ont été décidées en accord avec les instances du Parc national et avec l'IPAMAC.

Remarque importante : le tracé des limites du Parc naturel régional utilisé dans le cadre de ce travail est celui utilisé dans la chartre 2020-2035 du PNR.

2 Analyse des points lumineux

2.1 Données fournies

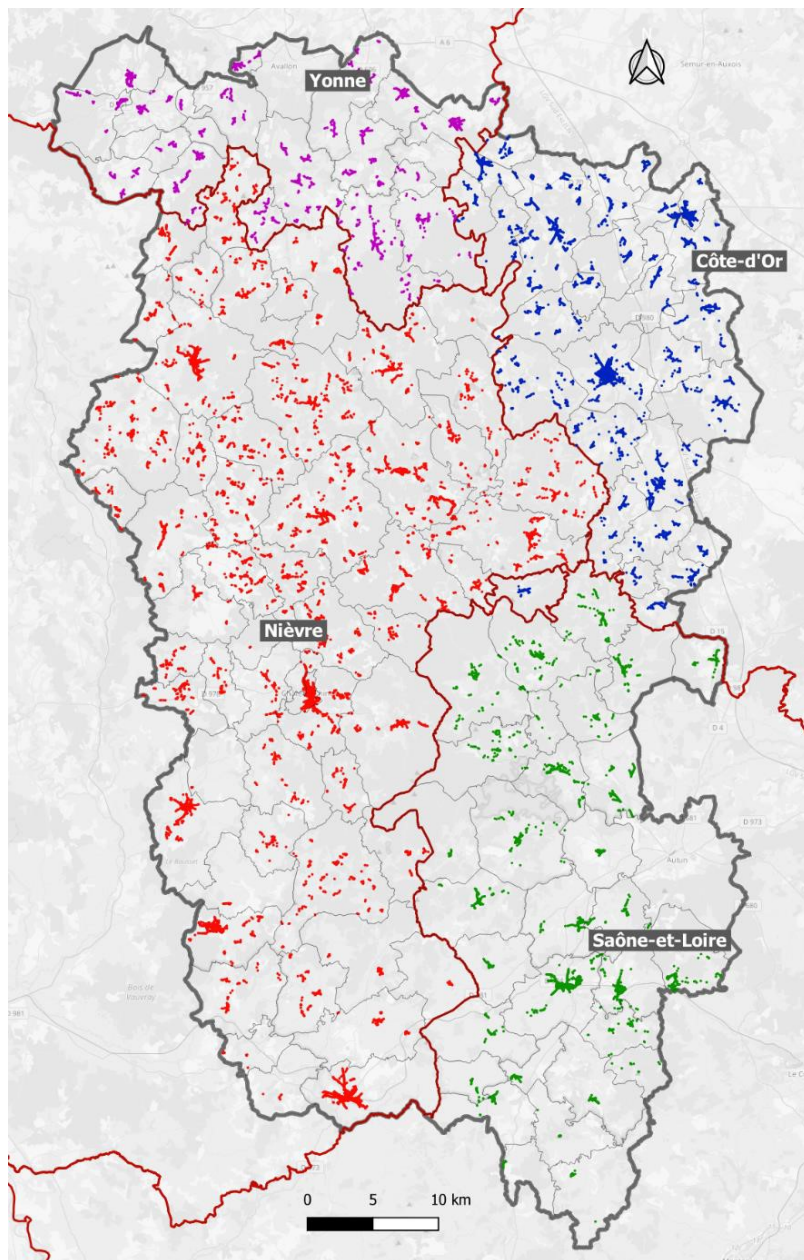
Dans le cadre du projet, le SICECO pour la Côte-d'Or, le SIEEEN pour la Nièvre, le SYDESL pour la Saône-et-Loire et le SDEY pour l'Yonne ont fourni des données de points lumineux de toutes les communes dont elles ont la charge sur le territoire du Parc (et au-delà pour certains départements). Seuls les points lumineux de 4 communes ne sont pas disponibles (Avallon, Foissy-lès-Vézelay, Bussières et Autun), soit parce que les relevés informatisés n'ont pas été réalisés, soit parce que les communes concernées gèrent elles-mêmes leurs parcs d'éclairage et n'ont pas été en capacité de fournir les données nécessaires.

La mise à disposition de ces données techniques constitue un effort important de la part des syndicats d'énergie et des instances du Parc qu'il convient de saluer.

Le tableau ci-dessous résume les données mises à disposition dans le cadre de l'étude (*PL* signifie *points lumineux* dans le tableau). Quelques observations sont fournies sur la qualité des données. Elles pourront être utiles pour les organismes en charge de la gestion des bases de données de points lumineux.

Parc	Département	Communes PNR (2019)	PL fournis	PL sur le PNR	Format	Commentaire
Morvan	Côte-d'Or	29	86 011	3 940	SHP	Pas de problème particulier n'a été rencontré pour transformer les données fournies pour tout le département de la Côte-d'Or (hormis certaines agglomérations comme Dijon et Châtillon-sur-Seine). <u>Toutes les communes sur le PNR sont couvertes</u> . Le CRS utilisé dans le fichier shapefile est le EPSG:2154. Les types de lampe et les puissances sont homogènes et facilement identifiables.
	Nièvre	55	9 294	8 285	SHP	Les points lumineux sont fournis pour <u>toutes les communes de la Nièvre sur l'empreinte du PNR</u> ainsi que pour 2 communes sur la bordure ouest du parc. La commune de Sermages ne possède que 7 points lumineux près d'une carrière et il n'y a pas a priori de points lumineux dans le petit bourg lui-même. Le CRS utilisé dans le fichier shapefile est le EPSG:3857. Les types de lampe et les puissances sont très homogènes et facilement identifiables.
	Saône-et-Loire	31	2 455	2 455	SHP	Les points lumineux sont fournis pour toutes les communes de Saône-et-Loire sur l'empreinte du PNR en coordonnées Lambert 93, sauf pour la commune d'Autun. Les types de lampe et les puissances sont très homogènes et facilement identifiables.
	Yonne	22	3 269	1 698	SHP	Les points lumineux sont fournis pour toutes les communes de l'Yonne sauf pour les 3 communes d'Avallon, Foissy-lès-Vézelay et Bussières. Les types de lampe et les puissances sont très homogènes et facilement identifiables.

On arrive donc à un total de plus de **100 000 points lumineux** fournis dont **16 378** se situent sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan.



Le carte ci-contre montre les points lumineux positionnés sur les limites des communes du PNR :

- En **bleu** les points lumineux sur les communes de Côte-d'Or fournis par le SICECO ;
- En **rouge** les points lumineux sur les communes de la Nièvre fournis par le SIEEEN ;
- En **vert** les points lumineux sur les communes de Saône-et-Loire fournis par le SYDESL ;
- En **violet** les points lumineux sur les communes de l'Yonne fournis par le SDEY.

Les limites entre les trois départements sont tracées en rouge et le contour du Parc naturel régional du Morvan (chartre 2020-2035) est indiqué par un trait fort gris-forcé.

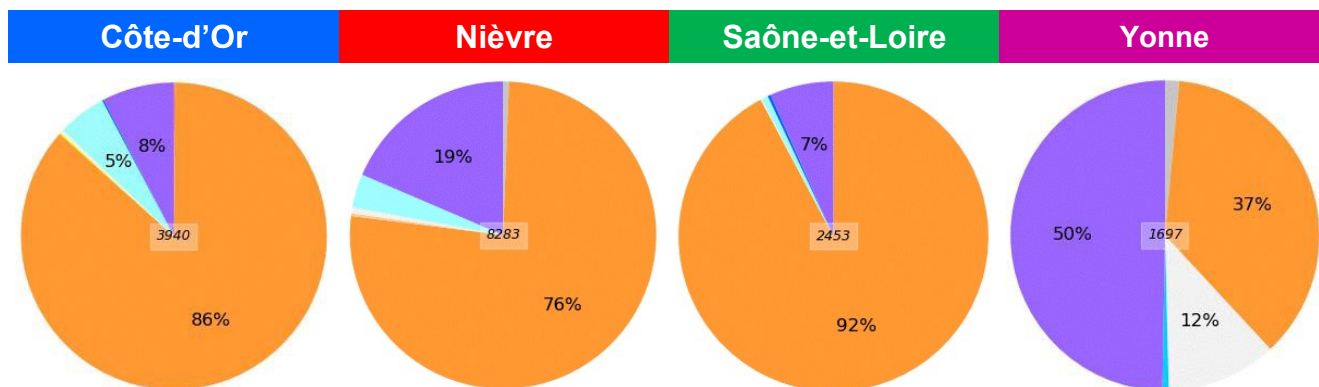
Carte des points lumineux sur le PNR fournis dans le cadre du projet

2.2 Statistiques sur les points lumineux du PNR du Morvan

2.2.1 Types de lampe

	Inconnu
	Sodium basse pression
	Sodium haute pression
	Incandescence
	Halogène
	Ballon fluo
	Halogénures métalliques
	Tube fluorescent
	Fluo-compacte
	Induction
	LED

Les données de points lumineux fournies permettent de produire des statistiques globales, ainsi que par communes, sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan (pour les départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne). La statistique la plus significative concerne les types des lampes utilisées. Les quatre diagrammes ci-dessous montrent la répartition globale par type de lampe pour les communes du PNR du Morvan, ceci pour chacun des quatre départements sur lesquels le PNR a une emprise et pour lesquels les points lumineux sont disponibles. Les couleurs utilisées pour les différents types de lampe sont fournies dans la légende ci-contre.



A quelques unités près, le nombre de points lumineux pour la Nièvre, la Saône-et-Loire et l'Yonne montrés sur les diagrammes ci-dessus sont identiques aux nombres de points lumineux reportés dans le tableau précédent. Les légères différences sont dues au fait que quelques points lumineux appartenant à des communes du Parc (donc pris en compte dans les statistiques par département) ne sont pas situés dans les limites officielles du PNR.

Les quatre tableaux suivants fournissent les proportions détaillées par type de lampe sur les quatre départements :

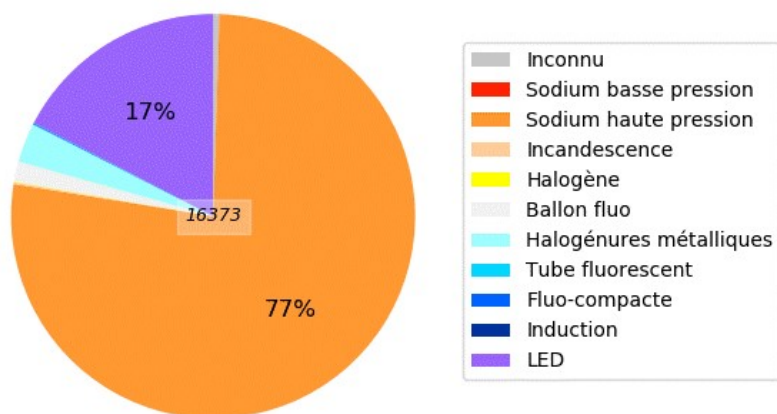
Côte-d'Or		Nièvre		Saône-et-Loire		Yonne	
Types de lampe (%)	Ratio	Types de lampe (%)	Ratio	Types de lampe (%)	Ratio	Types de lampe (%)	Ratio
Inconnu	0,1%	Inconnu	0,6%	Inconnu		Inconnu	1,5%
Sodium basse pression	0,1%	Sodium basse pression	0,0%	Sodium basse pression		Sodium basse pression	
Sodium haute pression	86,4%	Sodium haute pression	76,4%	Sodium haute pression	92,2%	Sodium haute pression	36,6%
Incandescence		Incandescence	0,3%	Incandescence		Incandescence	
Halogène	0,2%	Halogène	0,0%	Halogène	0,0%	Halogène	
Ballon fluo	0,4%	Ballon fluo	0,6%	Ballon fluo	0,1%	Ballon fluo	11,5%
Halogénures métalliques	5,1%	Halogénures métalliques	3,5%	Halogénures métalliques	0,7%	Halogénures métalliques	
Tube fluorescent		Tube fluorescent		Tube fluorescent		Tube fluorescent	0,6%
Fluo-compacte	0,2%	Fluo-compacte		Fluo-compacte	0,3%	Fluo-compacte	
Induction		Induction		Induction		Induction	
LED	7,6%	LED	18,6%	LED	6,6%	LED	49,7%

On constate une très forte prédominance du sodium haute-pression dans trois départements sur quatre (86% des parcs d'éclairage des communes du PNR du Morvan pour la Côte-d'Or, 79% pour la Nièvre et 92% pour la Saône-et-Loire), ce qui est globalement supérieur à la moyenne nationale. Par contre, la fraction de sodium haute-pression pour le département de l'Yonne est basse (37%).

On remarque aussi une quasi absence de lampes « ballon fluo » (lampes à vapeurs de mercure) sur trois départements (0,4% pour la Côte-d'Or, 0,6% pour la Nièvre et 0,1% pour la Saône-et-Loire) alors que cette technologie de lampe est plus présente sur le département de l'Yonne (11,5%). Ces ratios de lampes ballon fluo sont inférieurs à la moyenne nationale (13% de ballons fluo en 2015). Il est à noter que la vente de ce type de lampes à vapeur de mercure est interdite depuis le 13 avril 2015. Les communes du PNR sur les 3 départements de Côte-d'Or, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire sont donc en bonne conformité vis-à-vis des lampes à vapeur de mercure (seuls quelques points lumineux subsistent dans de petites communes). La situation est différente pour quelques communes du PNR sur le département de l'Yonne qui ont un nombre significatif de ballons fluo dans leurs parcs d'éclairage : Chastellux-sur-Cure (25), Fontenay-près-Vézelay (38), Island (15), Magny (18), Quarré-les-Tombes (86), Saint-Père (8) et Vézelay (6).

On remarque aussi une forte hétérogénéité sur les dispositifs à base de LED avec 3 départements qui en possèdent peu (respectivement 7,59%, 16,14% et 4,99% pour les communes du PNR en Côte-d'Or, Nièvre et Saône-et-Loire) et le département de l'Yonne qui en possède un grand nombre sur les communes intégrées au PNR (environ 50% du parc d'éclairage soit 844 dispositifs). Cela semble indiquer que les communes de l'Yonne sur le PNR ont très largement entamé la rénovation de leurs parcs d'éclairage avec une migration vers des technologies LED, alors que les communes de autres départements ont tout juste commencé ce processus (seules certaines communes de la Nièvre semblent avoir commencé une migration vers ces technologies). Cette migration vers la LED dans les communes de l'Yonne a pu être accélérée par la forte présence de lampes de type ballon fluo comme on peut encore le voir sur certaines communes. Pour la Côte-d'Or, la Nièvre et la Saône-et-Loire, la très faible proportion de lampes à vapeur de mercure semble indiquer que sur ces territoires, les communes ont plutôt converti les lampes ballon fluo vers du sodium haute-pression plutôt que vers des technologies LED, ce qui est relativement original (par comparaison avec d'autres études menées sur le territoire français) et plutôt positif car la température de couleur du sodium est conforme au nouvel arrêté et aux préconisations de l'IDA pour postuler au label de RICE (*Réserve Internationale de Ciel Etoilé* – voir la section 6.1). On remarque sur d'autres territoires que, souvent, la conversion aux technologies LED a été effectuée un peu trop tôt et avant que l'on soit arrivé à la phase de maturité des systèmes LED à faible température de couleur (inférieure à 3000K). Une conversion tardive n'est donc pas forcément une mauvaise chose.

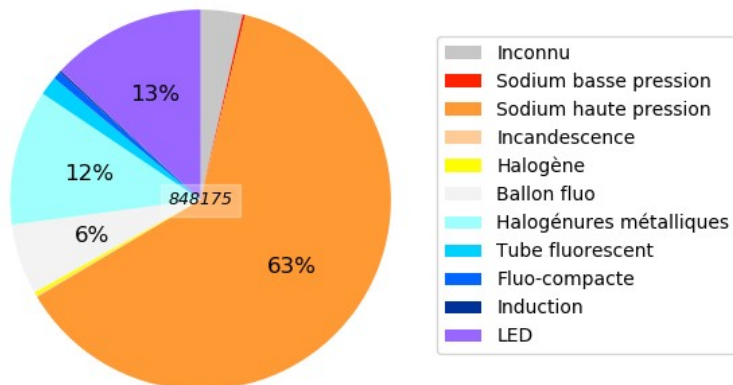
On peut finalement constater la faible part de lampes à halogénures métalliques sur les 4 départements (5,13% pour la Côte-d'Or, 3,54% pour la Nièvre et 0,94% pour la Saône-et-Loire) et on peut noter qu'il n'y a même pas une lampe de ce type dans les communes de l'Yonne sur l'empreinte du PNR !



Le diagramme ci-contre fournit la répartition par type de lampe pour toutes les communes du PNR pour lesquelles cette information est disponible, quel que soit leur département d'appartenance.

DarkSkyLab a pu réunir au fil des années un nombre significatif de points lumineux sur le territoire français (848 175 points lumineux dans 3 370 communes représentant donc un peu moins de 10% du parc français d'éclairage public). Ces données, issues de sources très variées, ne sont pas toutes très récentes et il faut donc les voir comme une statistique approximative d'un état du parc autour de l'année 2018. Le diagramme et le tableau suivants fournissent les statistiques obtenues sur ce parc global par types de lampe, ce qui permet de comparer la situation du PNR du Morvan par rapport à cet échantillon représentatif du parc français en 2018 :

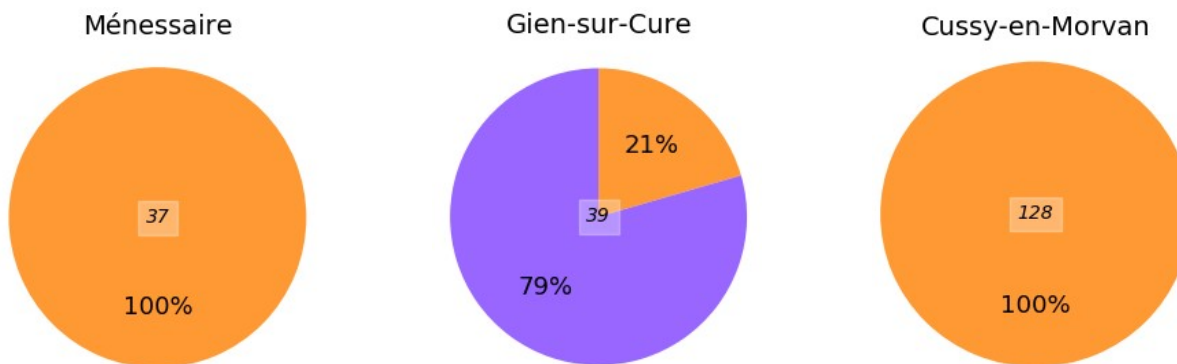
Types de lampes (sur 10% du parc français)



Types de lampe (%)	Total
Inconnu	3,6%
Sodium basse pression	0,2%
Sodium haute pression	62,7%
Incandescence	0,1%
Halogène	0,3%
Ballon fluo	6,0%
Halogénures métalliques	11,5%
Tube fluorescent	1,6%
Fluo-compacte	0,7%
Induction	0,2%
LED	13,1%

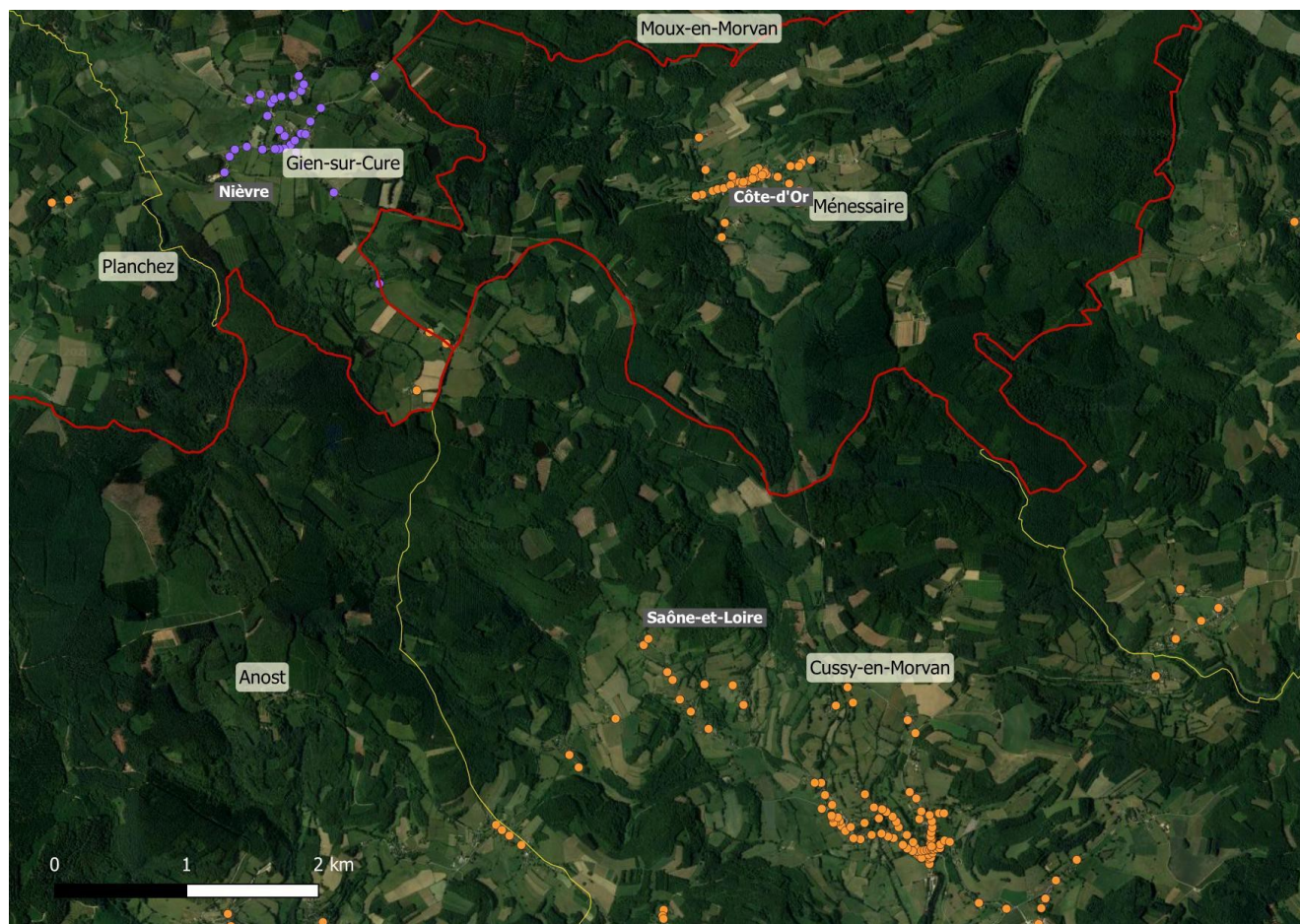
On peut bien vérifier que les lampes sodium haute pression sont plus largement utilisées dans le PNR que dans cet échantillon représentant l'éclairage en France (pour les communes des 3 départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire, contrairement aux communes de l'Yonne).

Les diagrammes et la carte ci-dessous montrent à titre d'exemple les ratios de lampes et l'implantation des points lumineux sur 3 communes voisines : Ménessaire (37 points lumineux, en Côte-d'Or), Gien-sur-Cure (39 points lumineux, dans la Nièvre) et Cussy-en-Morvan (128 points lumineux, en Saône-et-Loire).



La commune de Gien-sur-Cure possède un parc qui a subi une rénovation récente avec une majorité de dispositifs à LED (79%) alors que les deux autres possèdent un parc constitué à 100% de lampes sodium haute-pression.

Les codes couleur utilisés sont les mêmes que pour les diagrammes présentés au-dessus.

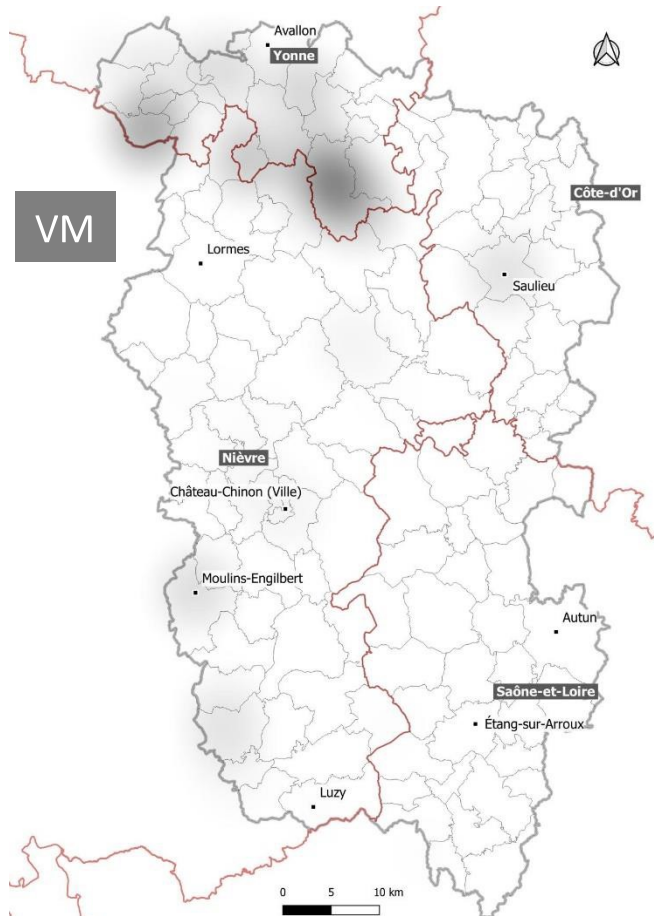
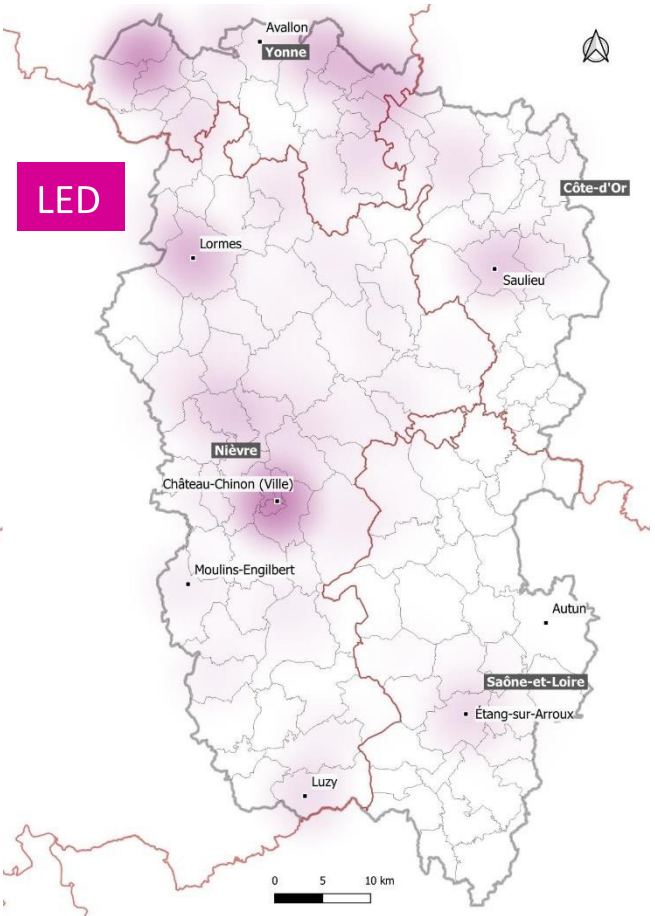
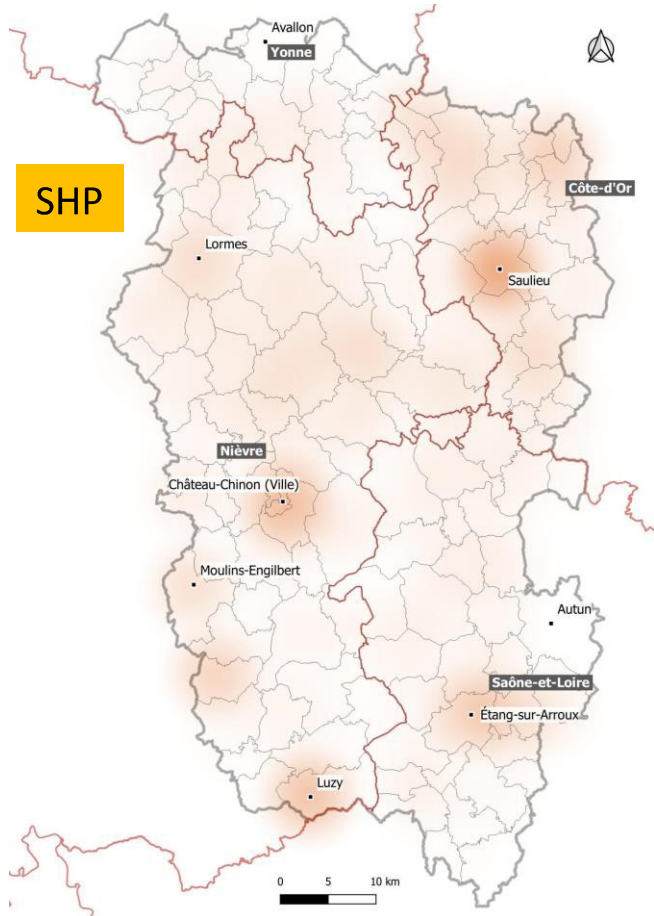


Points lumineux pour les communes de Ménessaire (37 points lumineux, en Côte-d'Or), Gien-sur-Cure (39 points lumineux, dans la Nièvre) et Cussy-en-Morvan (128 points lumineux, en Saône-et-Loire)

Les cartes détaillées de toutes les communes du PNR sont disponibles sur simple demande.

Il n'a pas été possible de réaliser une analyse des **températures de couleur** des dispositifs à base de LED installés sur les communes du PNR puisque cette information n'est pas fournie dans les fichiers de données de points lumineux. Dans le cadre d'un projet de constitution d'une RICE (*Réserve Internationale de Ciel Etoilé* – voir section 6.1), la connaissance des températures de couleur serait un prérequis important puisqu'il s'agit d'une donnée essentielle à fournir dans le dossier de candidature. Cet aspect est particulièrement important pour les communes de l'Yonne sur l'empreinte du PNR qui intègrent un grand nombre de ces dispositifs.

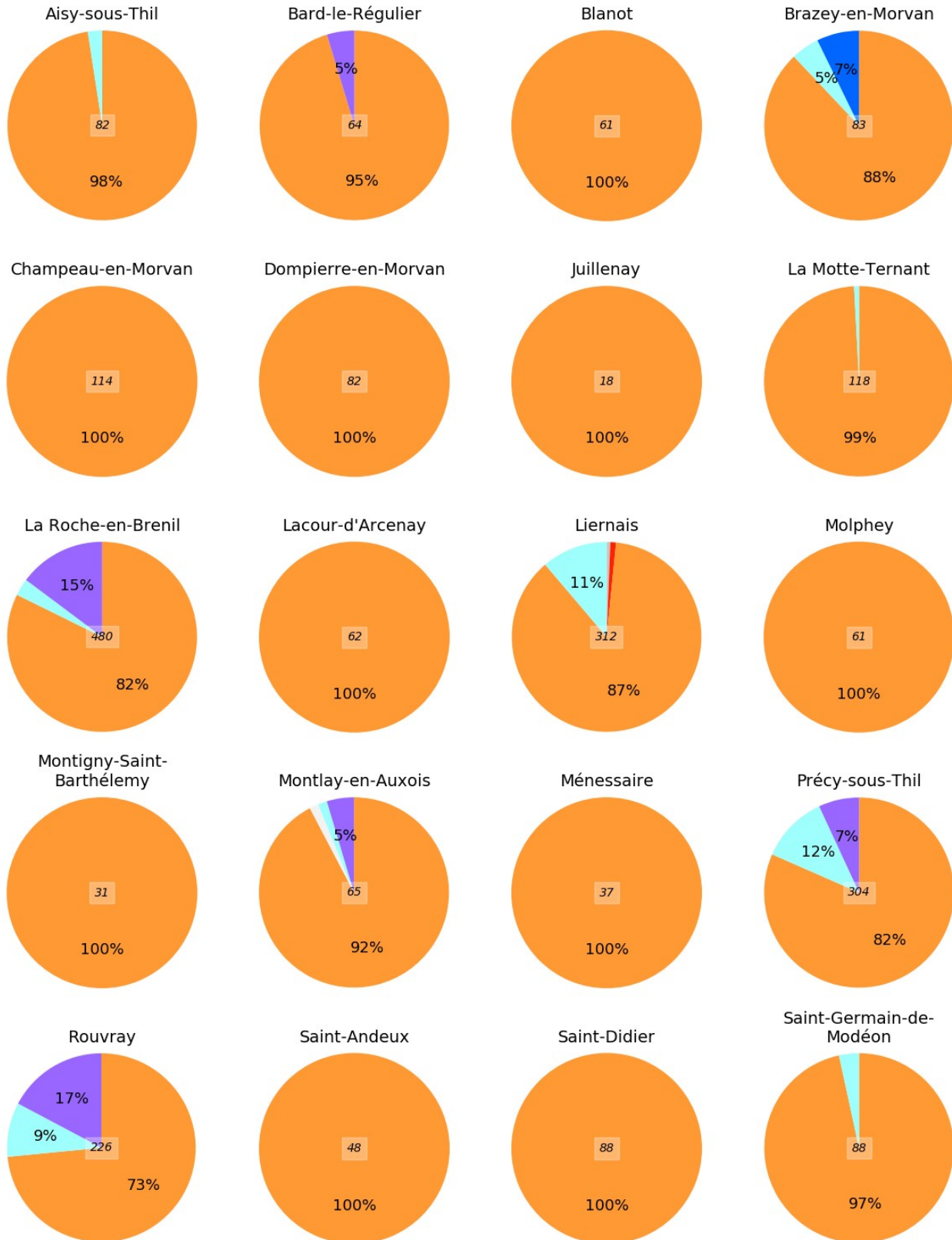
Il est intéressant de visualiser à quels endroits du territoire du Parc naturel régional du Morvan on trouve les plus fortes densités de lampes sodium haute-pression, LED et vapeurs de mercure. Pour cela, les 3 cartes ci-dessous montrent les diagrammes de densité pour ces 3 types de lampes sur le territoire du PNR : plus la diffusion est prononcée, plus la densité du type de lampe concerné est importante. On constate que les lampes sodium haute-pression sont bien présentes sur l'ensemble des communes de la Côte-d'Or, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire (avec des densités plus fortes sur les grosses agglomérations) et peu présentes dans l'Yonne. Les lampes à base de LED sont présentes comme attendu dans l'Yonne mais aussi dans les zones de Château-Chinon et Lormes dans la Nièvre. Enfin, il y a une forte concentration de lampes à vapeur de mercure sur la commune de Quarré-les-Tombes et Fontenay-près-Vézelay dans L'Yonne plus que partout ailleurs sur le territoire.



Diagrammes de densité des lampes de type sodium haute-pression, LED et vapeurs de mercure sur le territoire du PNR

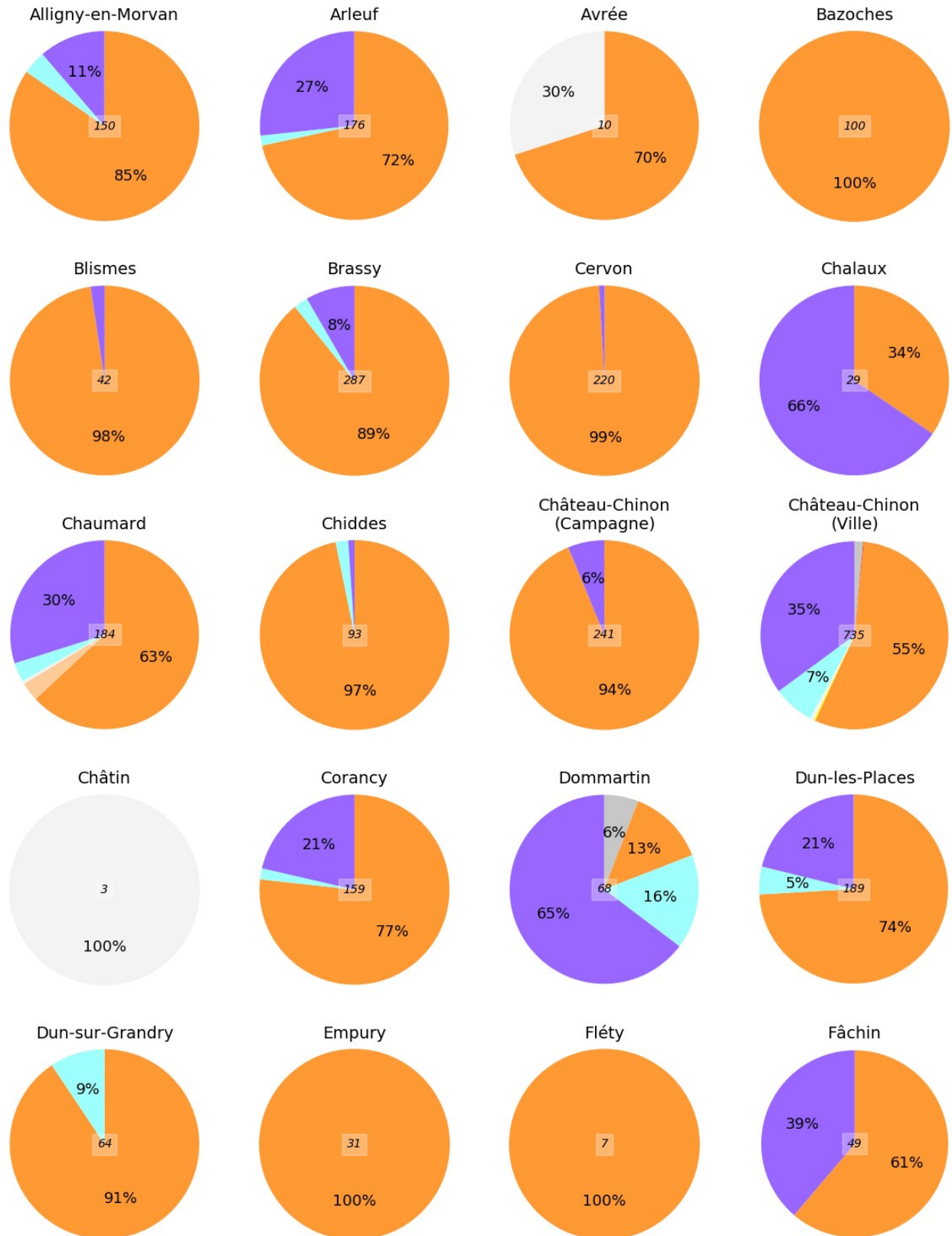
Les graphiques présentés sur les pages suivantes fournissent les répartitions par type de lampe pour toutes les communes du PNR du Morvan sur les départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et enfin de l'Yonne. Le nombre de points lumineux par commune est indiqué au centre de chaque diagramme.

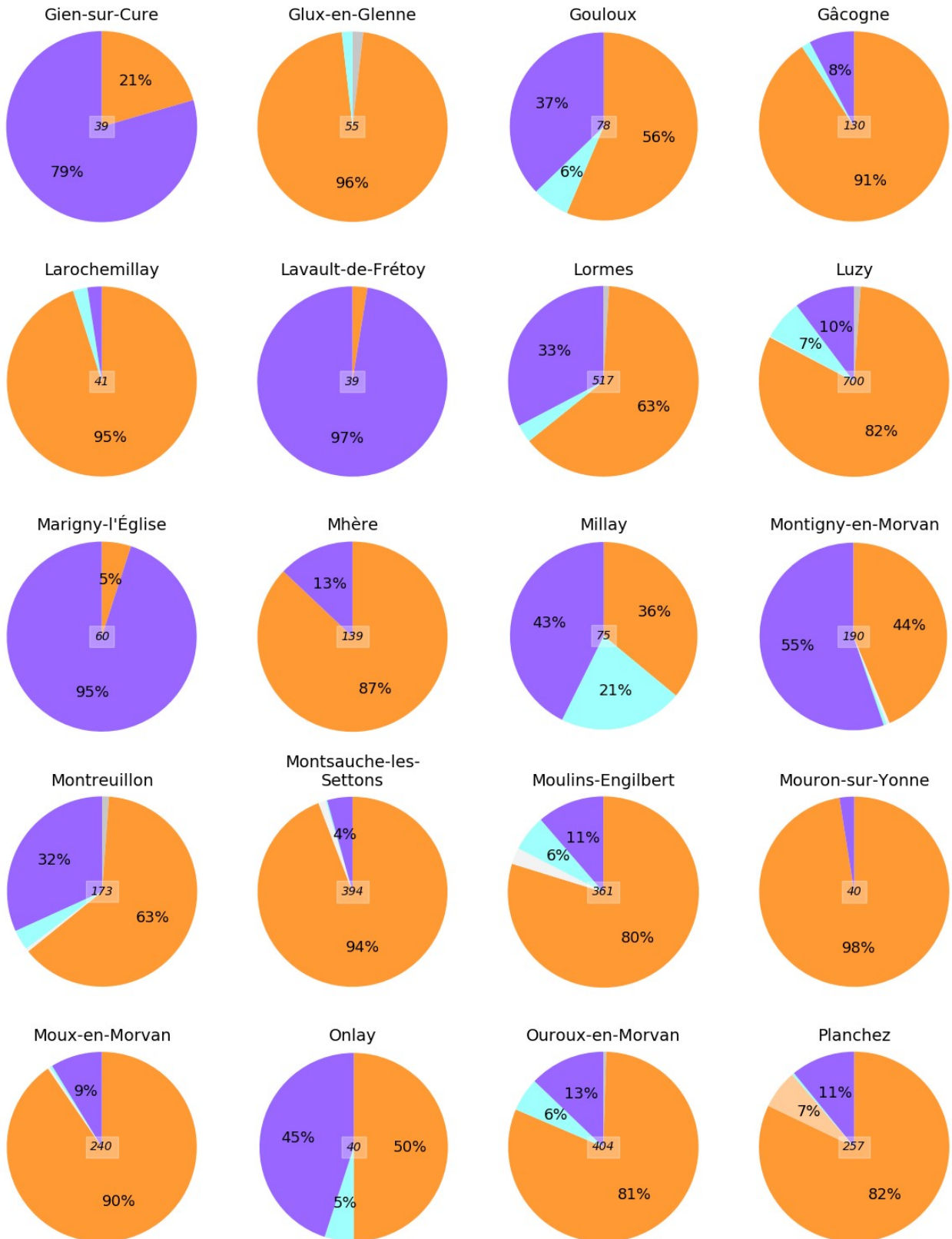
Côte-d'Or

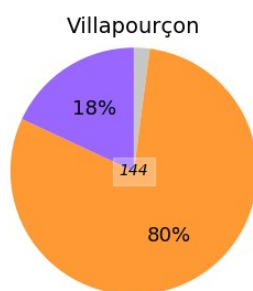
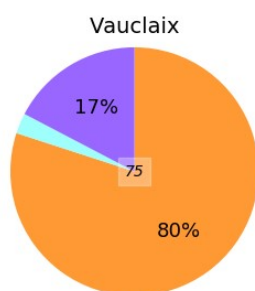
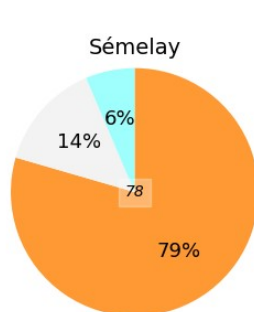
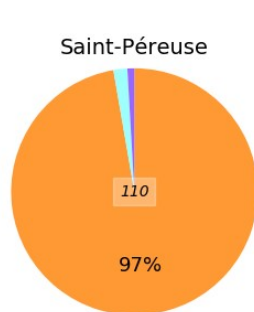
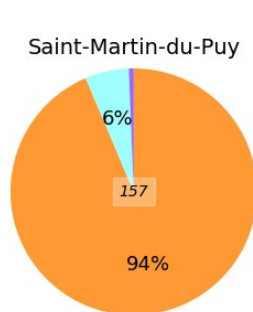
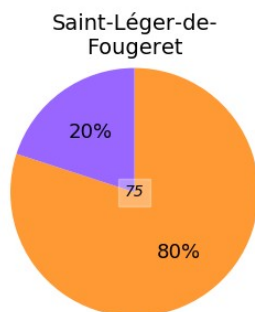
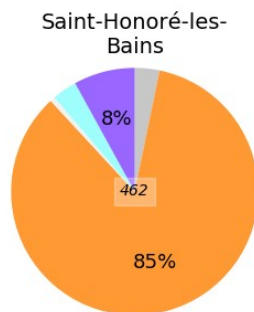
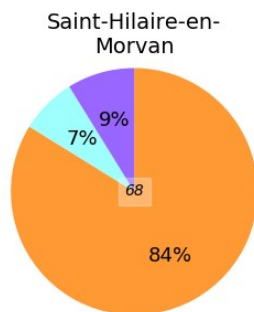
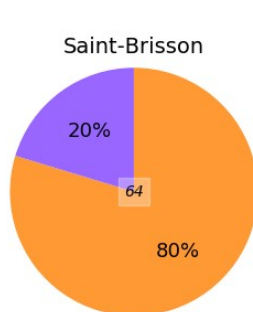
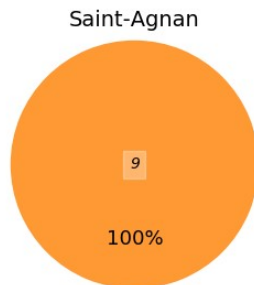
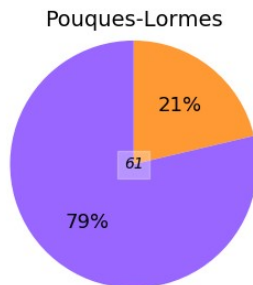
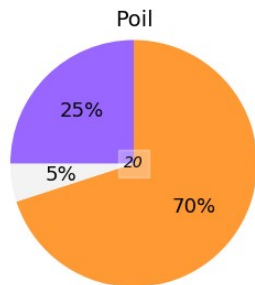




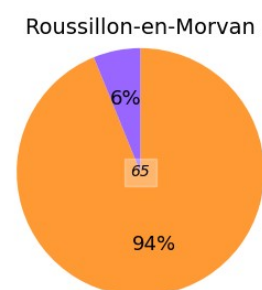
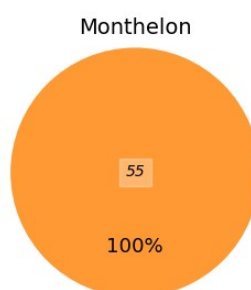
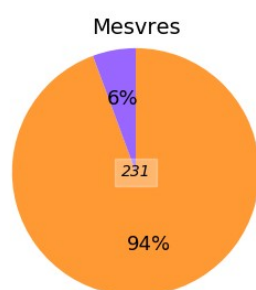
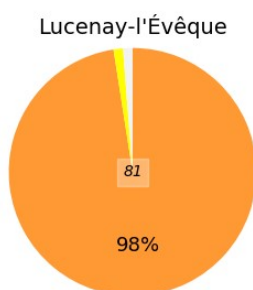
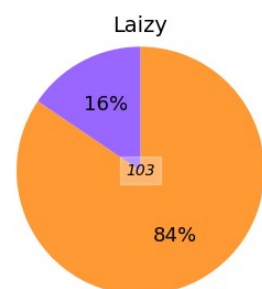
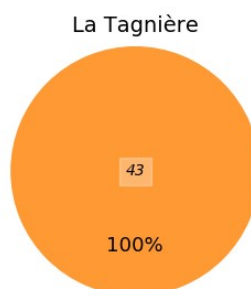
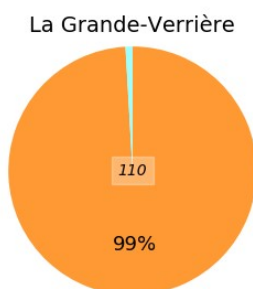
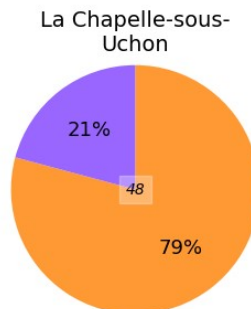
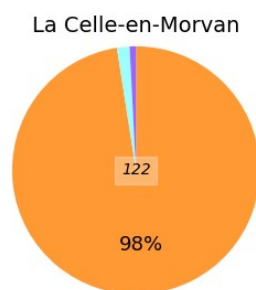
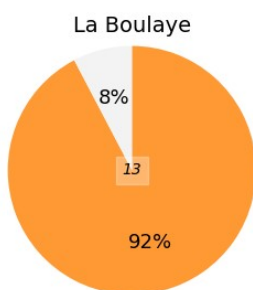
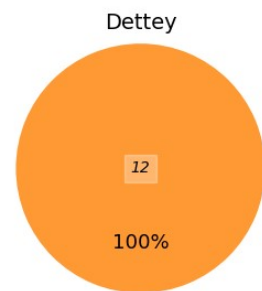
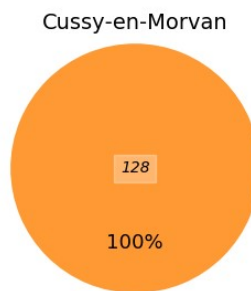
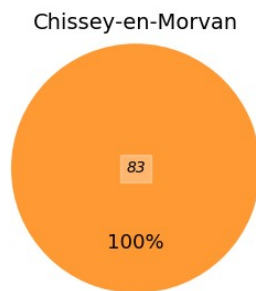
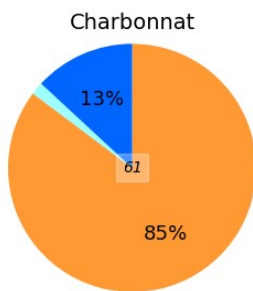
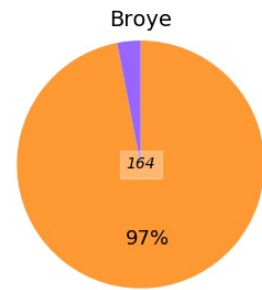
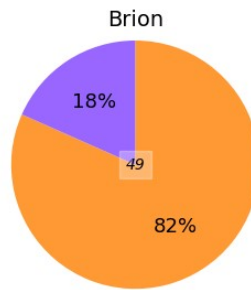
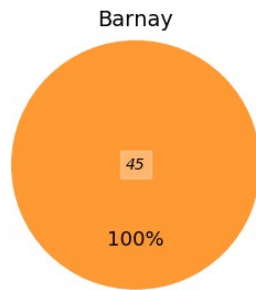
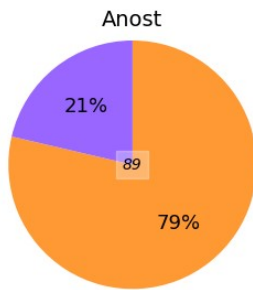
Nièvre

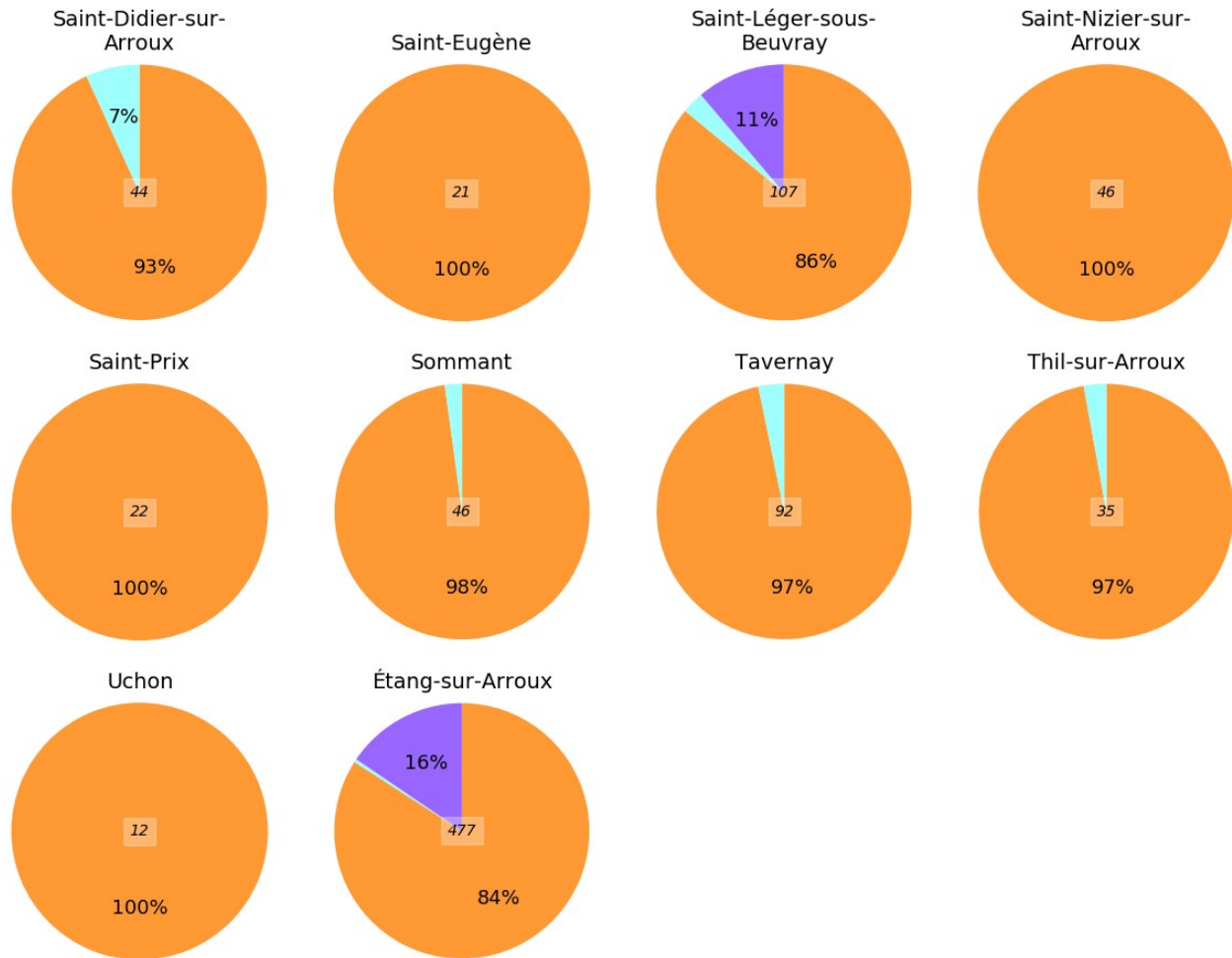




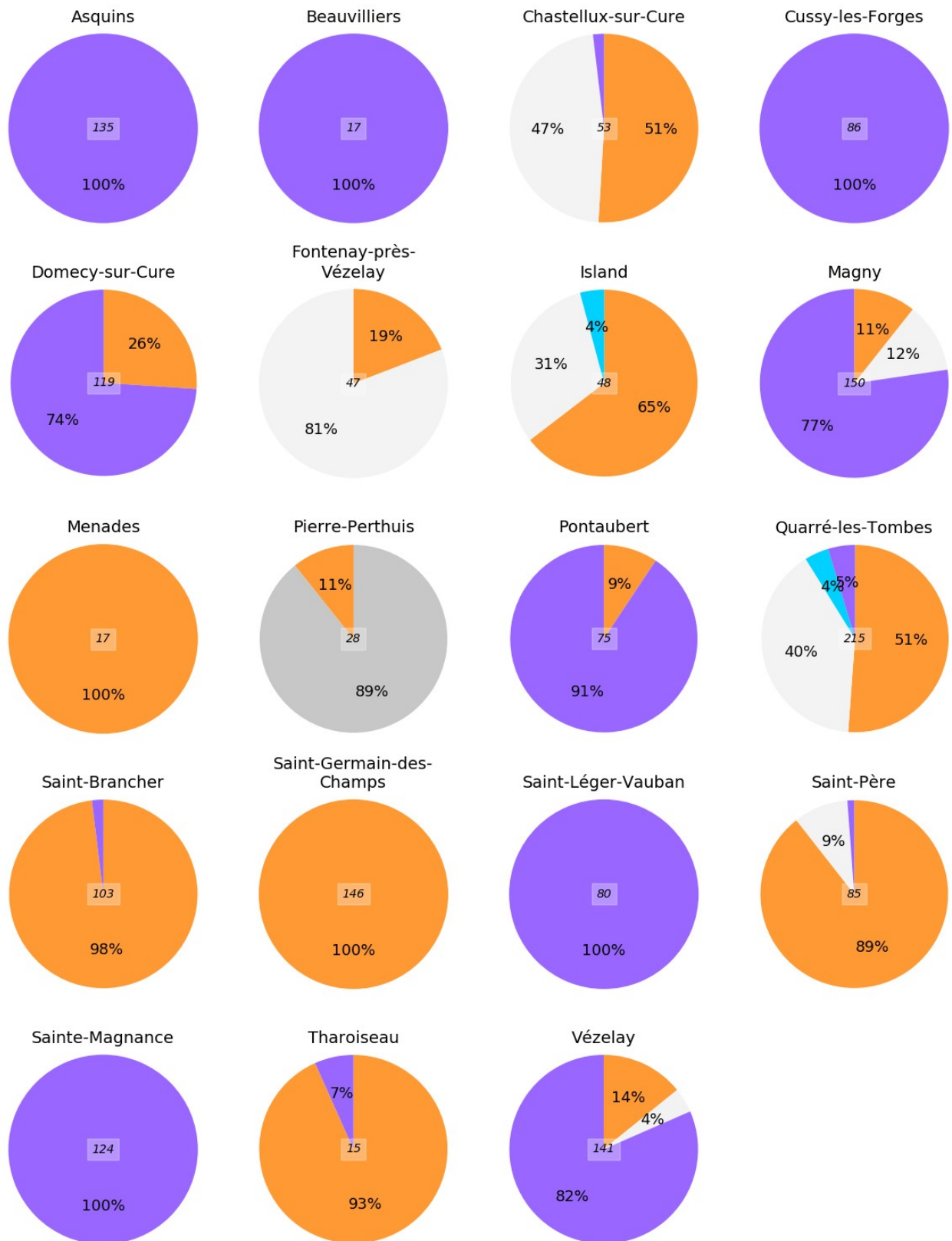


Saône-et-Loire



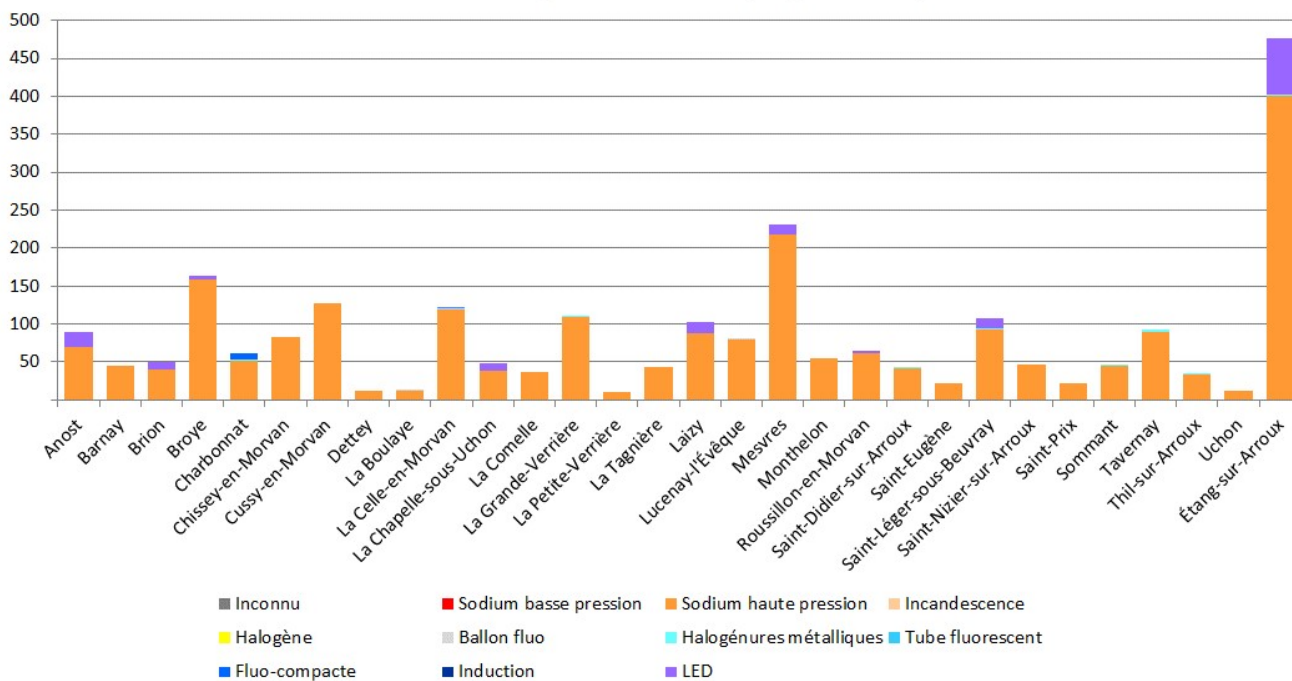


Yonne

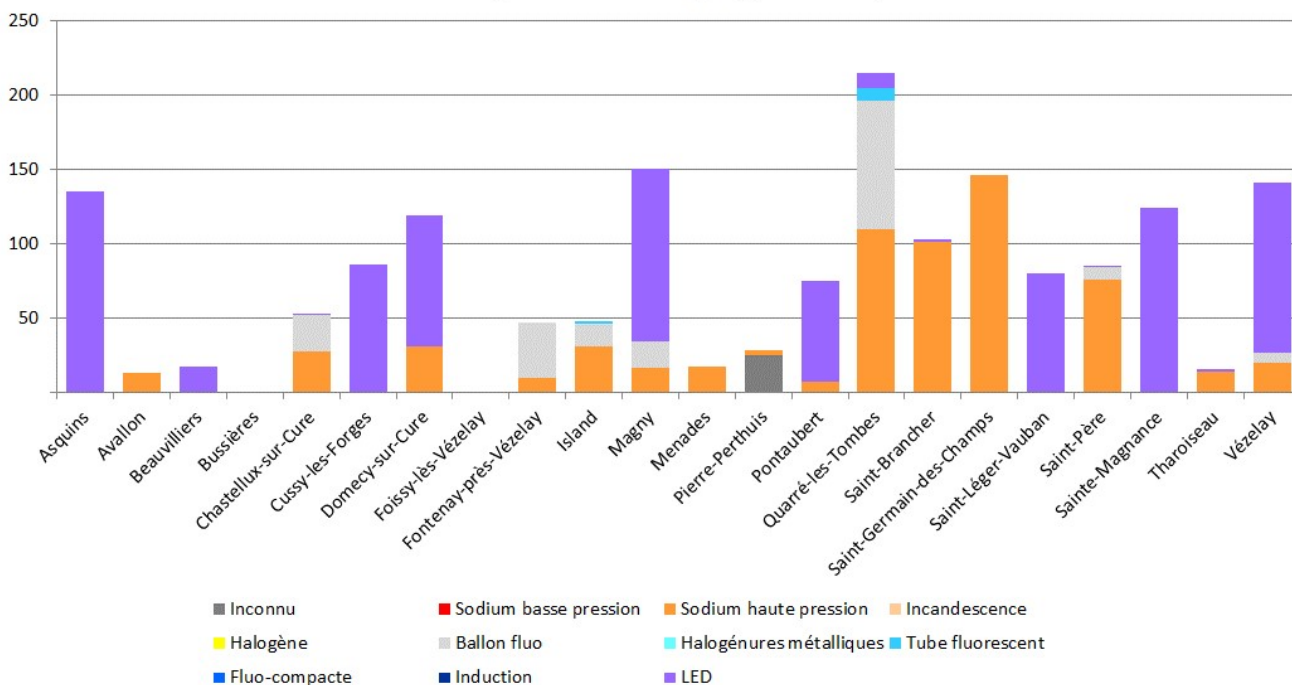


On peut noter la forte dominance des lampes sodium haute-pression sur la plupart des communes. Seules les communes sur le département de l'Yonne et quelques communes de la Nièvre ont clairement engagé une conversion vers la LED.

Saône-et-Loire (périmètre du PNR) - Types de lampe



Yonne (périmètre du PNR) - Types de lampe

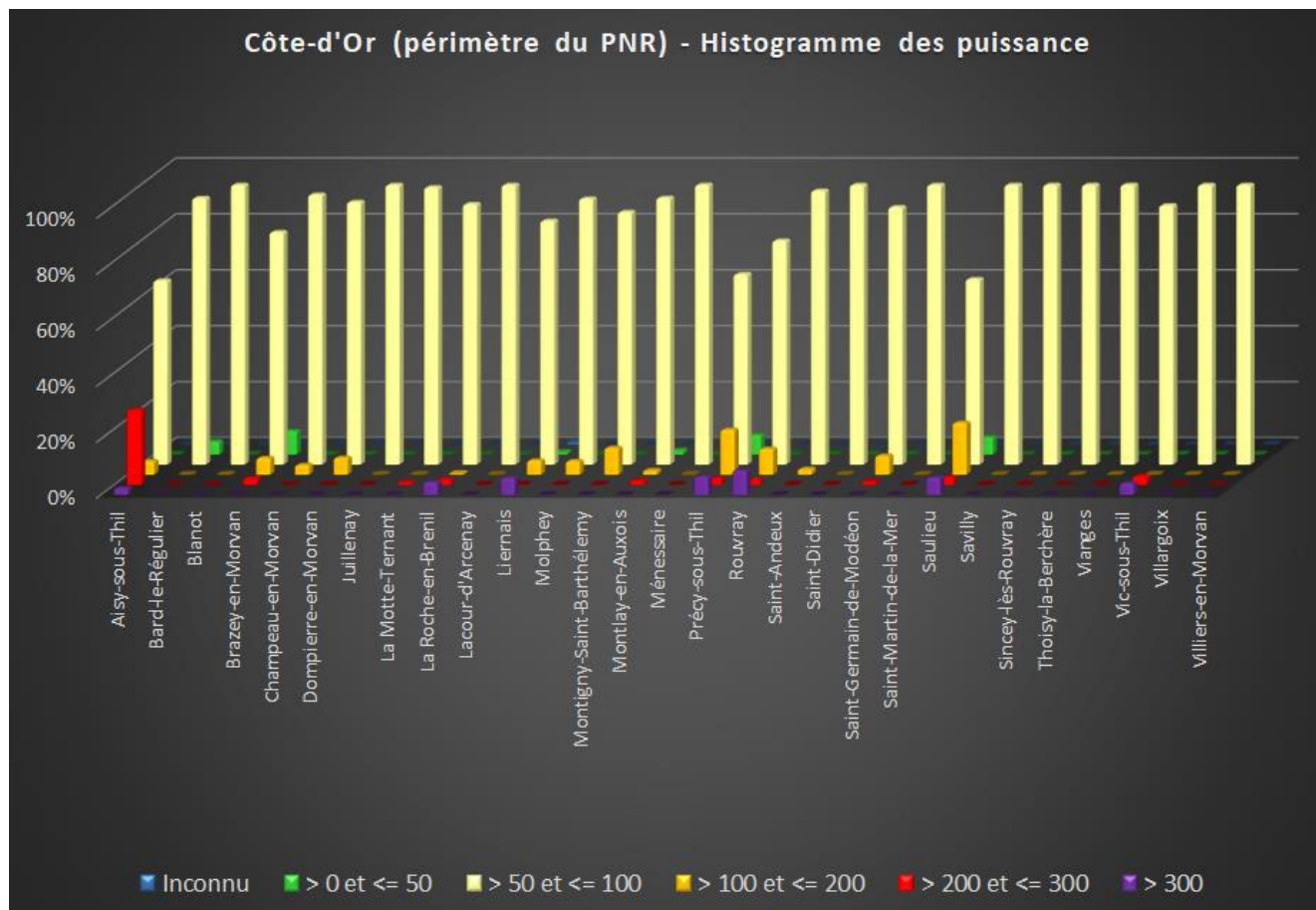


Quelques points lumineux appartenant à d'autres communes sont présents sur le territoire de la commune d'Avallon ce qui explique la présence de cette commune sur l'histogramme précédent pour le département de l'Yonne.

2.2.2 Puissances

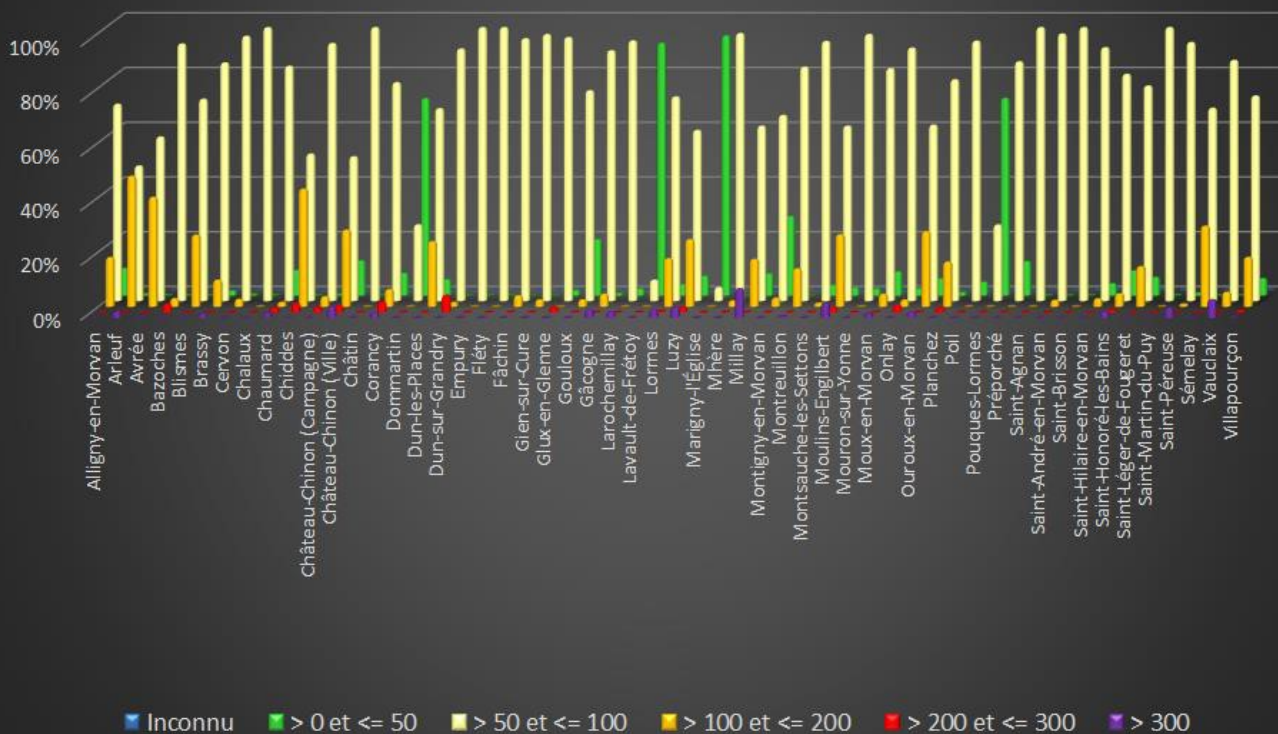
Les données de points lumineux fournies permettent aussi d'obtenir des statistiques sur les puissances installées. Les histogrammes ci-dessous montrent la répartition des puissances par commune en

définissant 5 classes énergétiques : entre 0 et 50W (vert), 50 et 100 W (jaune clair), 100 et 200 W (orange), 200 et 300 W (rouge) et plus de 300 W (violet), ceci pour les trois départements de la Côte-d’Or, la Nièvre et la Saône-et-Loire (et là aussi uniquement pour les communes sur l’emprise du PNR du Morvan).



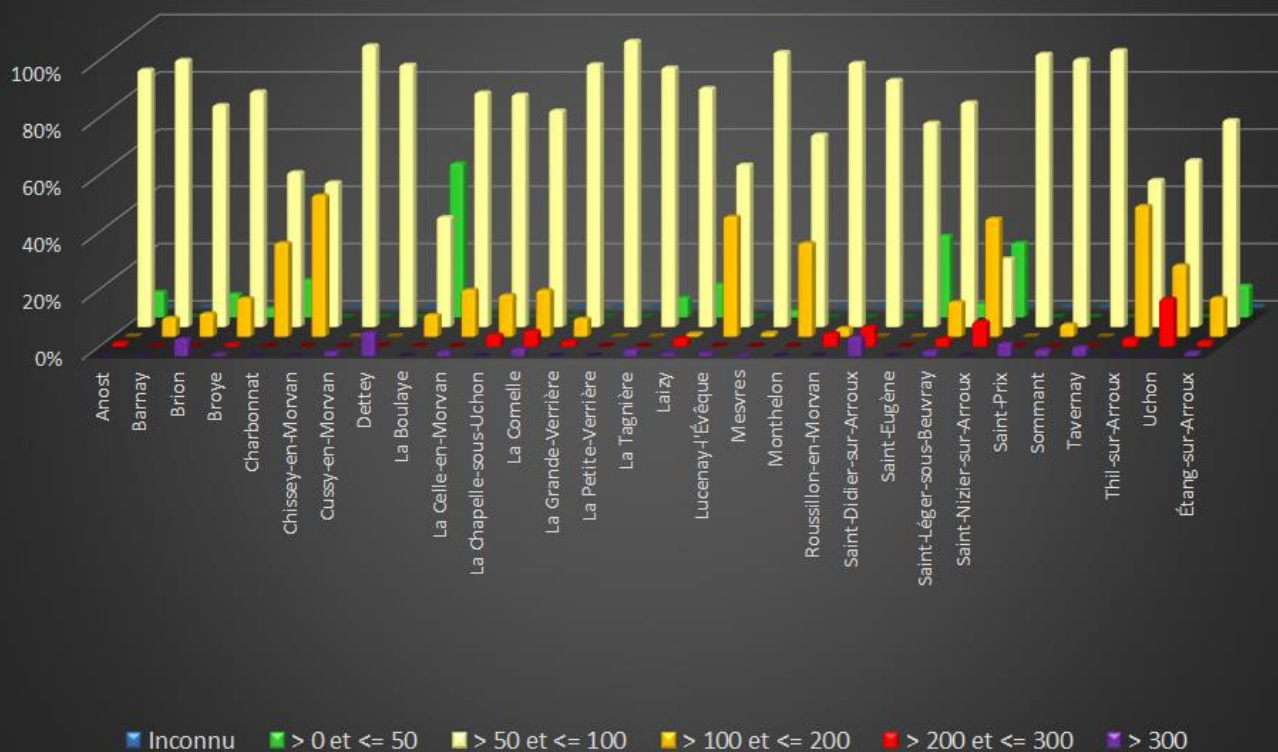
Histogramme de puissance des dispositifs sur le département de la Côte-d'Or

Nièvre (périmètre du PNR) - Histogramme des puissance

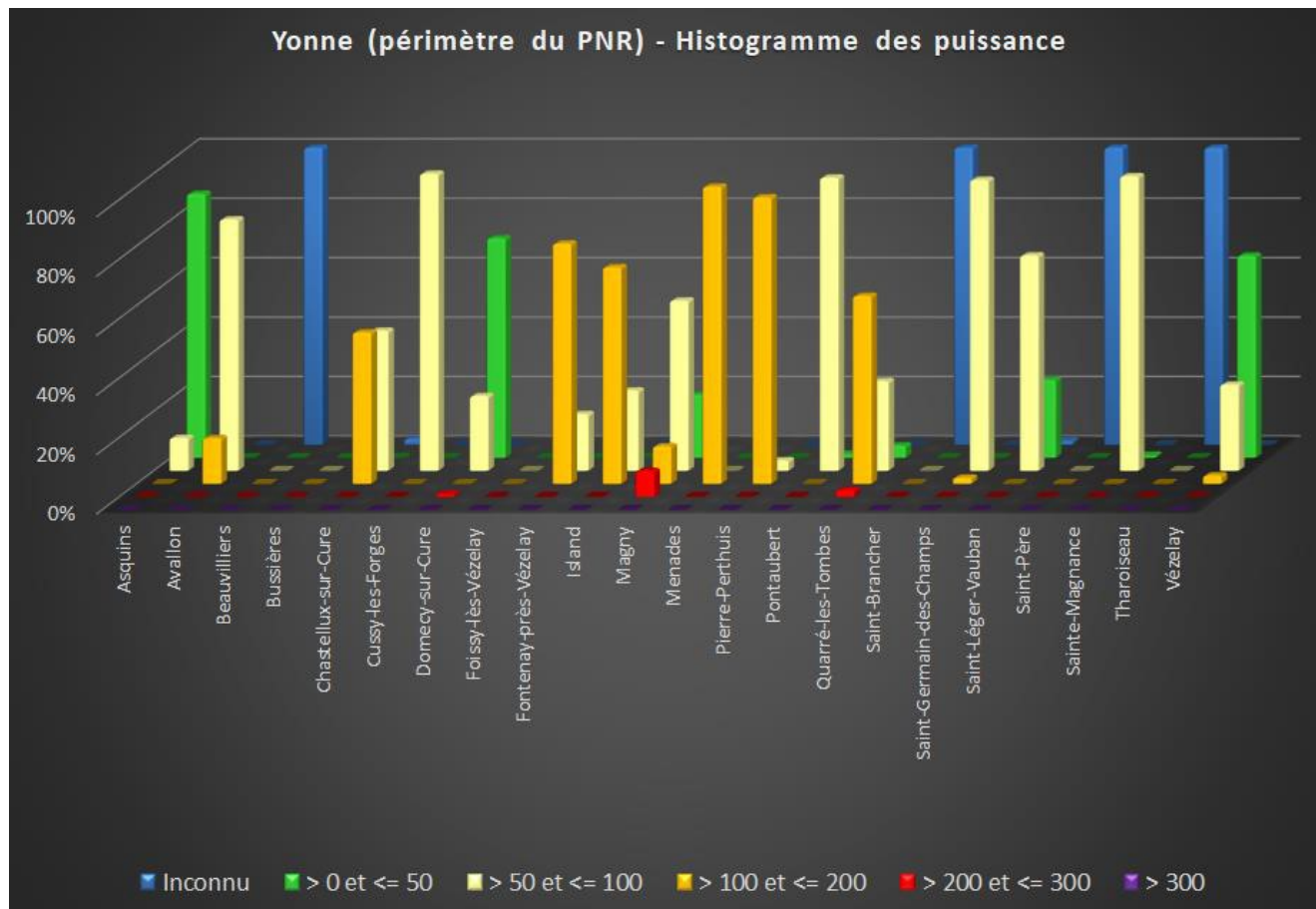


Histogramme de puissance des dispositifs sur le département de la Nièvre

Saône-et-Loire (périmètre du PNR) - Histogramme des puissance



Histogramme de puissance des dispositifs sur le département de la Saône-et-Loire



Histogramme de puissance des dispositifs sur le département de l'Yonne

Pour les trois départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire, on remarque la très forte prédominance de dispositifs avec des puissances comprises entre 50 et 100W (barres jaune clair). Cela est lié à l'utilisation massive de lampes sodium haute-pression de puissance intermédiaire sur les trois territoires. Pour le département de l'Yonne, les dispositifs de faible puissance sont plus présents du fait de l'utilisation de dispositifs à base de LED (barres vertes). On remarque aussi que pour les communes du PNR sur ce département, toutes les puissances ne sont pas connues (barres bleues). Sur les 4 diagrammes, les dispositifs de forte puissance (barres rouges) sont généralement liés à des dispositifs de mise en valeur du patrimoine.

2.3 Inventaire des points lumineux

La grande majorité des communes des départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne sur l'empreinte du Parc naturel régional du Morvan ont leurs points lumineux renseignés et il est donc possible de calculer des statistiques qui mettent en lien le nombre de points lumineux et la population des communes qui composent ces territoires.

Les tableaux ci-dessous présentent une analyse globale des bases de données fournies par le SICECO pour la Côte-d'Or, le SIEEEN pour la Nièvre, le SYDESL pour la Saône-et-Loire et le SDEY pour l'Yonne.

Communes du Parc naturel régional du Morvan en Côte d'Or

Nombre de communes avec points lumineux	29
Nombre de communes sans points lumineux	0
Nombre de points lumineux	3940
Nombre d'habitants des communes avec points lumineux	9263
Nombre d'habitants des communes sans points lumineux	0
Ratio nombre de points lumineux par habitant	0.425
Ratio habitants par point lumineux	2.351
Estimation du nombre de points lumineux manquants	0

Communes du Parc naturel régional du Morvan dans la Nièvre

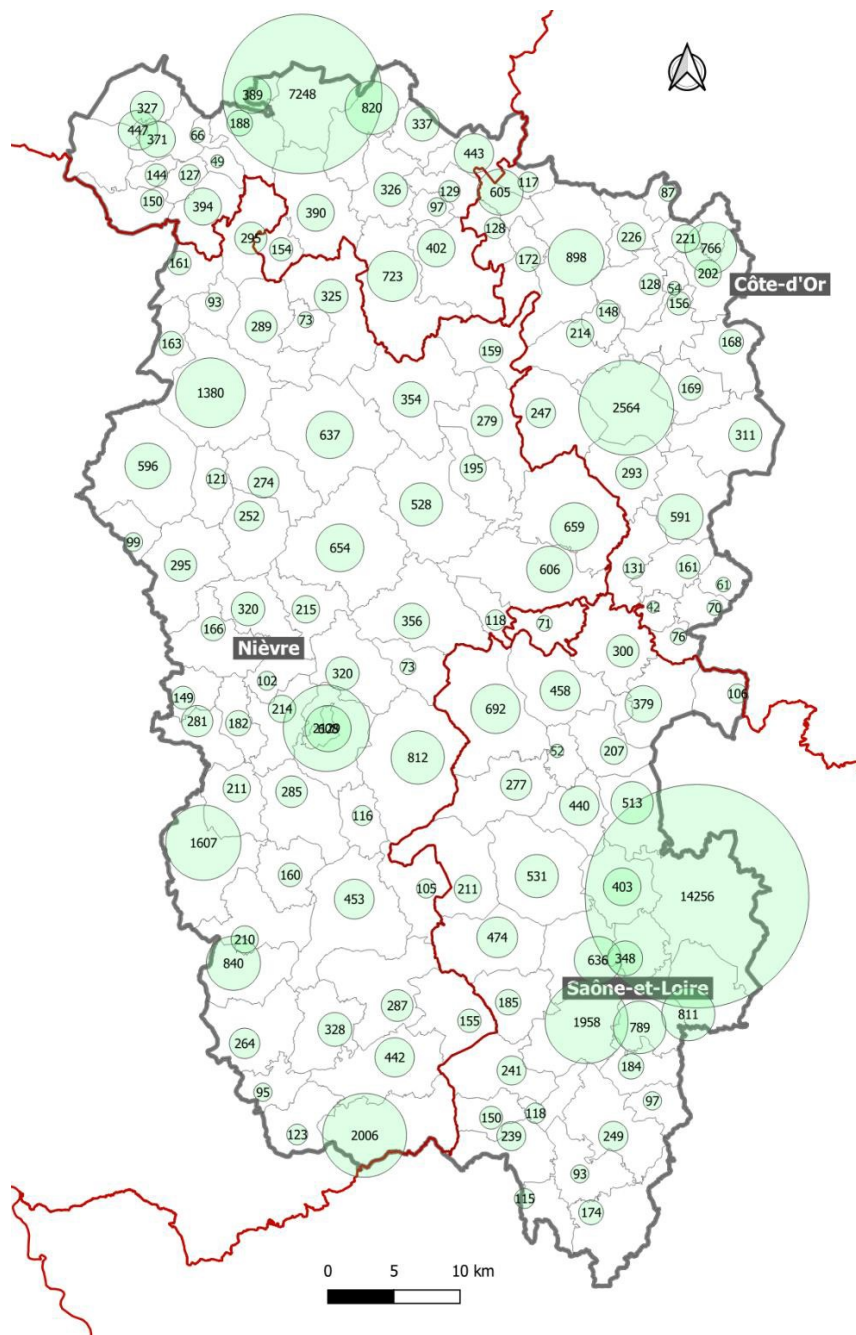
Nombre de communes avec points lumineux	54
Nombre de communes sans points lumineux	1
Nombre de points lumineux	8276
Nombre d'habitants des communes avec points lumineux	22287
Nombre d'habitants des communes sans points lumineux	205
Ratio nombre de points lumineux par habitant	0.371
Ratio habitants par point lumineux	2.693
Estimation du nombre de points lumineux manquants	76

Communes du Parc naturel régional du Morvan en Saône-et-Loire

Nombre de communes avec points lumineux	30
Nombre de communes sans points lumineux	1
Nombre de points lumineux	2452
Nombre d'habitants des communes avec points lumineux	11544
Nombre d'habitants des communes sans points lumineux	15212
Ratio nombre de points lumineux par habitant	0.212
Ratio habitants par point lumineux	4.708
Estimation du nombre de points lumineux manquants	3225

Communes du Parc naturel régional du Morvan dans l'Yonne

Nombre de communes avec points lumineux	19
Nombre de communes sans points lumineux	3
Nombre de points lumineux	1684
Nombre d'habitants des communes avec points lumineux	6293
Nombre d'habitants des communes sans points lumineux	7696
Ratio nombre de points lumineux par habitant	0.268
Ratio habitants par point lumineux	3.737
Estimation du nombre de points lumineux manquants	2062



Populations des communes de la zone d'étude

L'indicateur du **nombre de points lumineux par habitant** (en rouge dans les tableaux) peut être comparé entre les différents départements. Il est nettement plus élevé en Côte-d'Or alors que la Saône-et-Loire a le ratio le plus bas des 4 départements. La moyenne nationale est d'environ 0,17 points lumineux par habitant.

Les différences entre les ratios peuvent en partie s'expliquer par la taille des agglomérations présentes sur les différents territoires (le ratio a tendance à augmenter dans les villes moyennes). Pour la Saône-et-Loire, le ratio est très probablement diminué par le fait que les données de la Ville d'Autun ne sont pas disponibles. La carte ci-contre montre les emplacements des communes sur les 4 départements avec des disques dont le rayon est proportionnel à la population.

On voit sur cette carte que la taille des agglomérations n'explique pas à elle seule la grande disparité des ratios nombre de points lumineux par habitant, et l'explication est peut-être à chercher ailleurs.

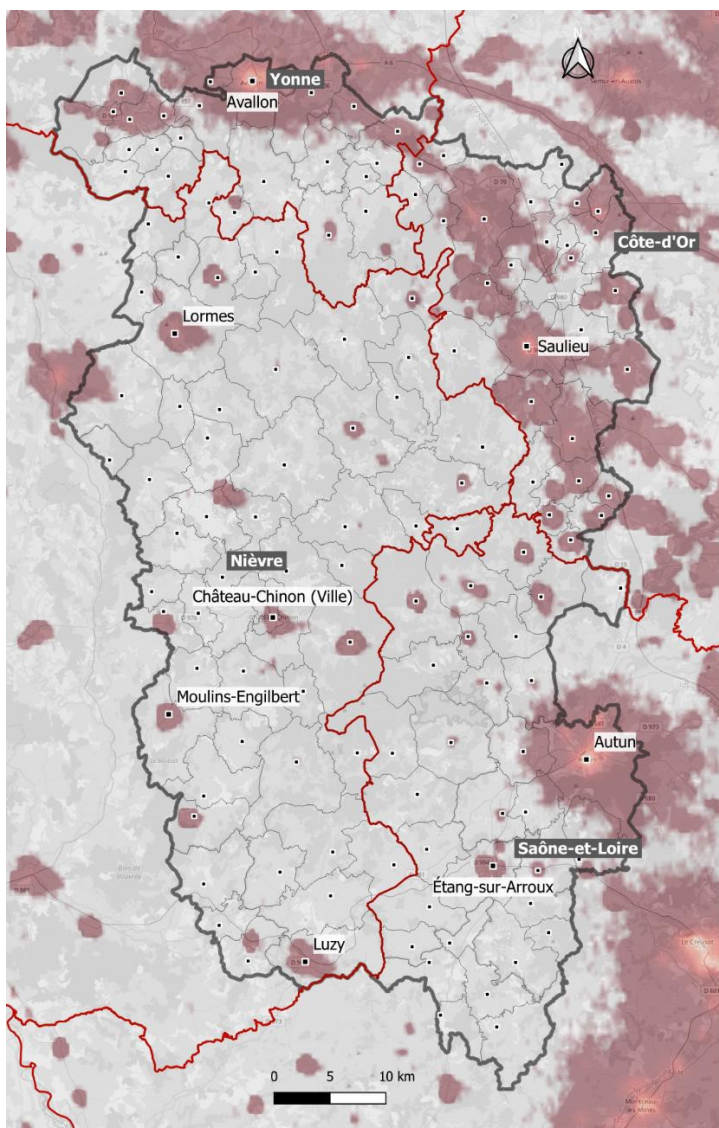
3 Analyse des extinctions

Aucune donnée facilement exploitable n'existe concernant les extinctions pratiquées par les communes sur l'emprise du Parc naturel régional du Morvan. L'identification de ces extinctions est malgré tout importante puisqu'elle sert à réaliser des simulations de la pollution lumineuse en extrémités de nuit (c'est-à-dire sans extinction de l'éclairage public).

DarkSkyLab a développé un logiciel qui permet d'identifier les extinctions probables sur un territoire en utilisant des données de radiance satellite récentes et en les comparant aux données de population

des bourgs (et pas des communes puisque plusieurs bourgs peuvent être regroupés pour former une seule commune).

Afin d'identifier au mieux les extinctions, il a été décidé d'utiliser dans le cadre de ce projet les données VIIRS-DNB d'un jeu synthétique assemblé à partir de radiances satellites mensuelles¹ de l'année 2019. Ce processus de création d'un jeu synthétique à partir de données de radiances mensuelles a été développé par DarkSkyLab sachant, qu'à ce jour, le NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) ne fournit pas de jeux composites annuels en dehors des années 2015 et 2016.



Radiancesatellite du jeu synthétique 2019 sur le territoire du PNR

La carte ci-contre montre les sources de radiance 2019 sur la zone d'étude. Le contraste de la carte de radiance a été poussé de manière à ce que dès qu'une radiance non nulle est présente, elle apparaît en rouge sur le fond gris de la carte (le fond gris indique donc qu'aucune radiance n'a été mesurée). Les radiances plus élevées sont représentées par une couleur rouge plus claire, par exemple dans le centre des agglomérations. Les radiances les plus faibles sont mesurées autour de $0,01 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ alors que les plus élevés sont à environ $25 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ dans le centre d'Avallon au nord du Parc et $34 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ dans le centre d'Autun au sud-est du Parc.

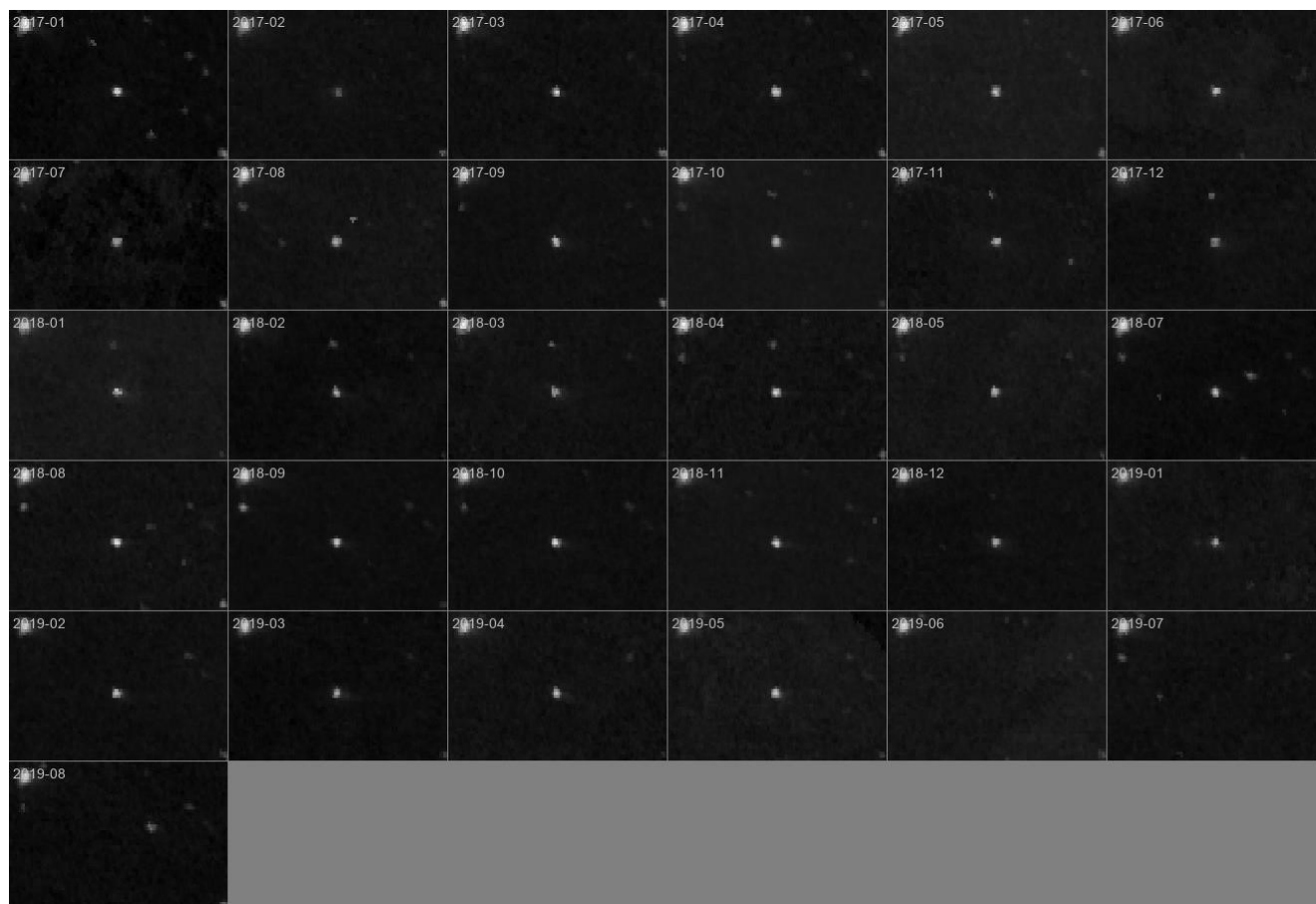
Les centres-bourgs sont marqués sur la carte par des petits carrés noirs. On remarquera que l'autoroute A6 à l'est d'Avallon crée un arc de radiance significatif (avec des niveaux de l'ordre de $0,15 \text{ nW.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$), ce qui montre que la contribution du trafic automobile n'est pas négligeable vis-à-vis de la pollution lumineuse.

On peut constater sur cette carte qu'un grand nombre de bourgs n'ont aucune radiance associée ou bien des radiances très faibles (particulièrement sur le département de la Nièvre ainsi qu'au sud de la partie du PNR qui est en Saône-et-Loire). Il apparaît donc que la pratique de l'extinction est très répandue sur l'emprise du Parc naturel régional du Morvan. Il faut toutefois garder en tête qu'il y a un nombre important de petites communes sur ce territoire, et qu'il se peut aussi que la radiance associée à de très petits parcs d'éclairage ne soit pas détectée par le détecteur des satellites utilisés.

¹ Voir les données du NOAA sur https://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html

Les petites zones de radiance qui ne sont pas associées à des bourgs témoignent d'une implantation spécifique significative (industrie, équipement sportif, grande exploitation agricole, ...). On peut remarquer qu'il n'y en a quasiment pas sur les parties du PNR appartenant à la Nièvre et à la Saône-et-Loire mais qu'elles sont par contre assez nombreuses en Côte-d'Or, ce qui témoigne de la présence d'un plus grand nombre d'activités industrielles ou artisanales ou bien de grosses exploitations agricoles sur ce département.

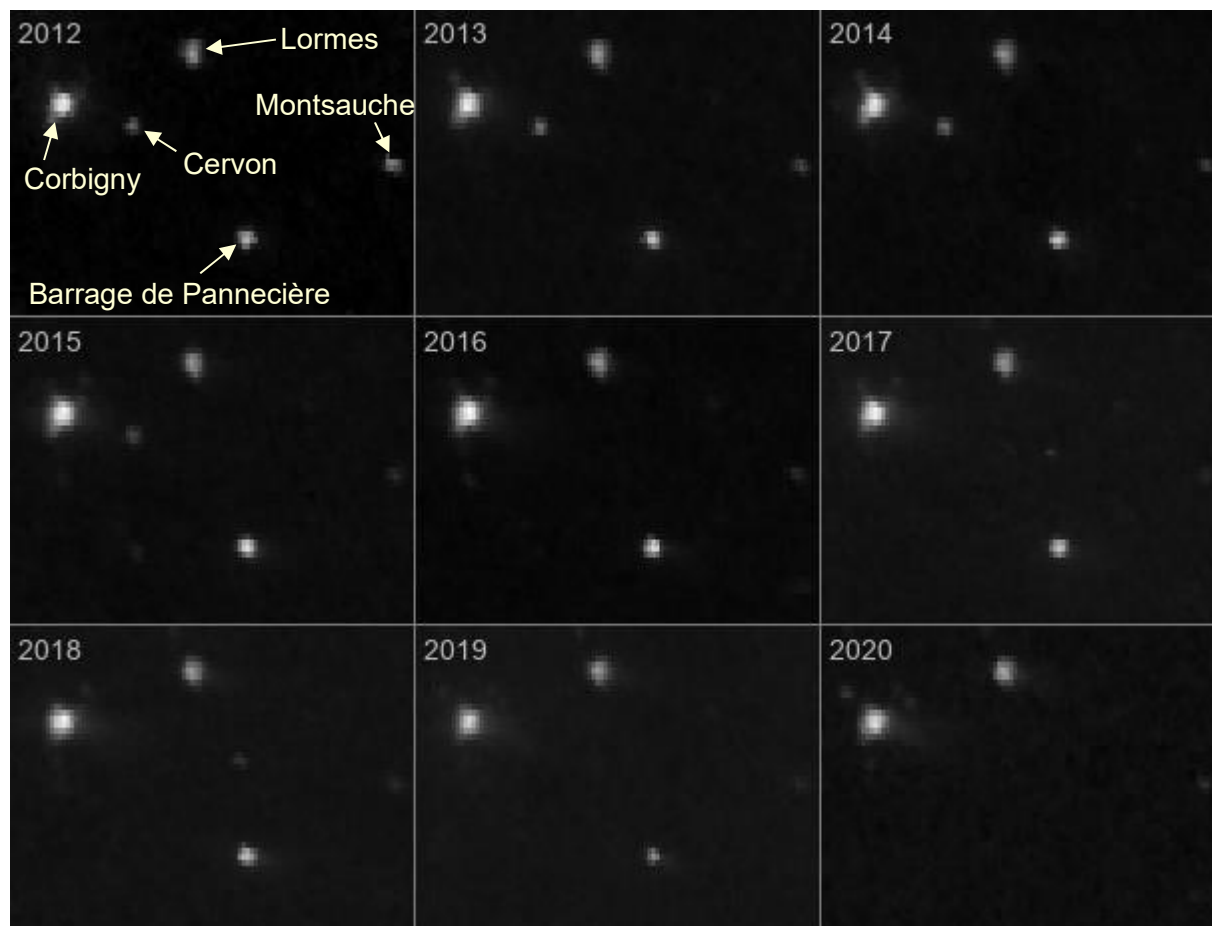
Une zone de radiance isolée est tout de même visible dans la partie centrale de la partie du PNR située sur le département de la Nièvre. Il s'agit du barrage du lac de Pannecière où un grand nombre de « lampadaires boule » sont installés. Une analyse des radiances de la zone du barrage du lac de Pannecière montre cependant que ces lampadaires ont été démontés ou éteints puisque la radiance sur cette zone disparaît à partir de juin 2019 sur les données satellite. La mosaïque ci-dessous montre la zone du barrage (au centre des imageries) sur les données de radiance satellite mois par mois depuis janvier 2017 :



Radiance sur la zone du barrage du lac de Pannecière mois par mois depuis janvier 2017

On peut constater que la radiance disparaît en juin 2019 alors qu'elle est présente systématiquement auparavant. Lors des simulations de pollution lumineuse présentées plus loin dans ce document, cette zone de radiance a été éliminée afin de représenter la situation actuelle.

Afin de mieux apprécier la radiance liée à l'éclairage de la zone du barrage de Pannecière, une autre extraction a été réalisée sur les jeux de données VIIRS-DNB, mais cette fois en réalisant des regroupements par année et en n'utilisant que les mois d'hiver de manière à limiter les sources de bruit (en effet, les jeux de radiance mensuels fournis par le NOAA sont de moins bonne qualité, voire inexistant, durant les mois d'été du fait de la durée réduite des nuits). Le résultat est montré dans la figure ci-dessous :

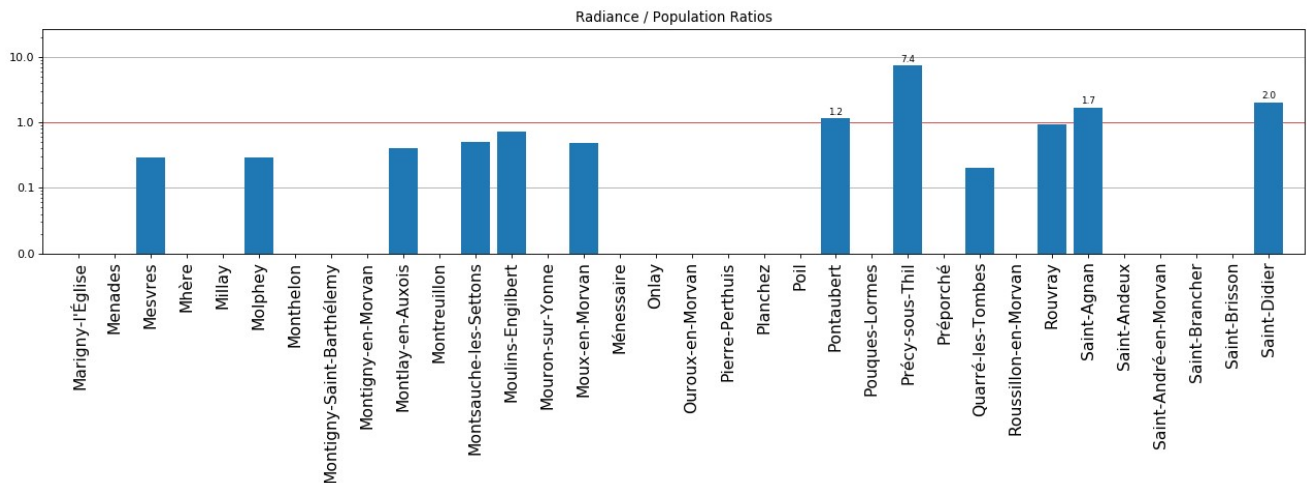
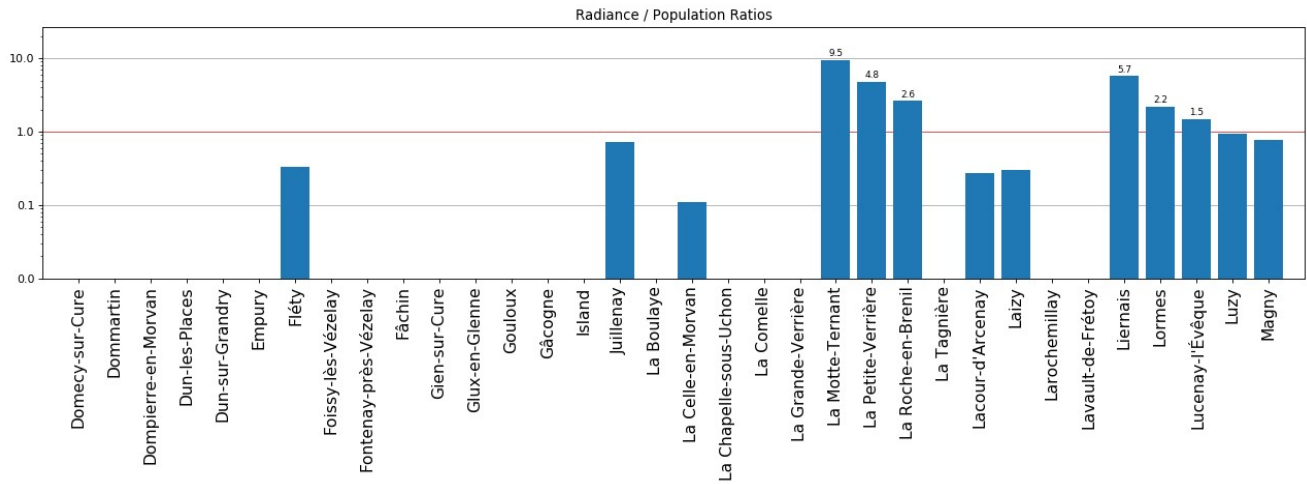
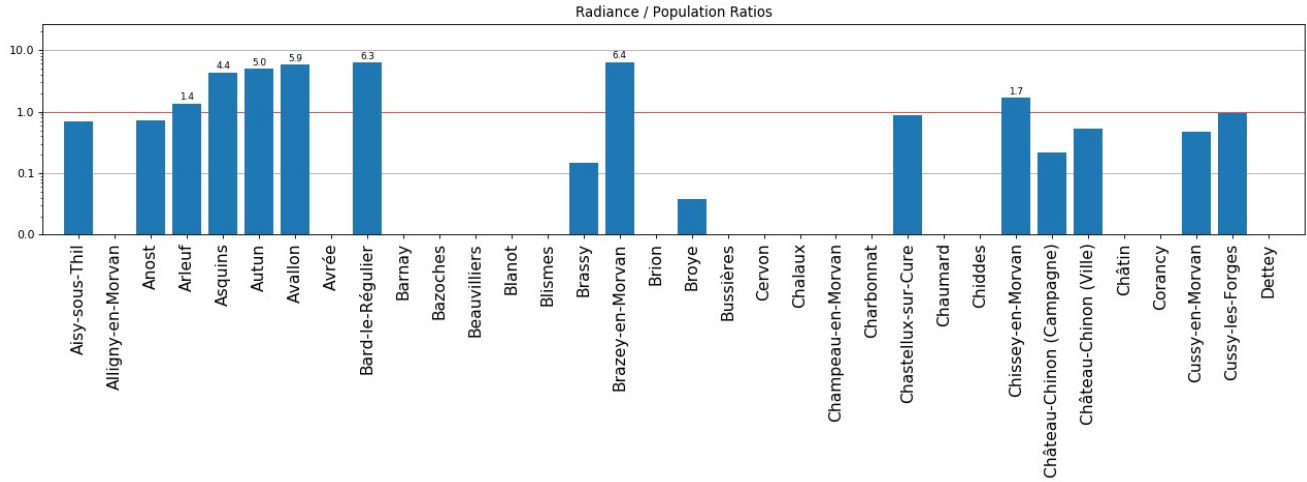


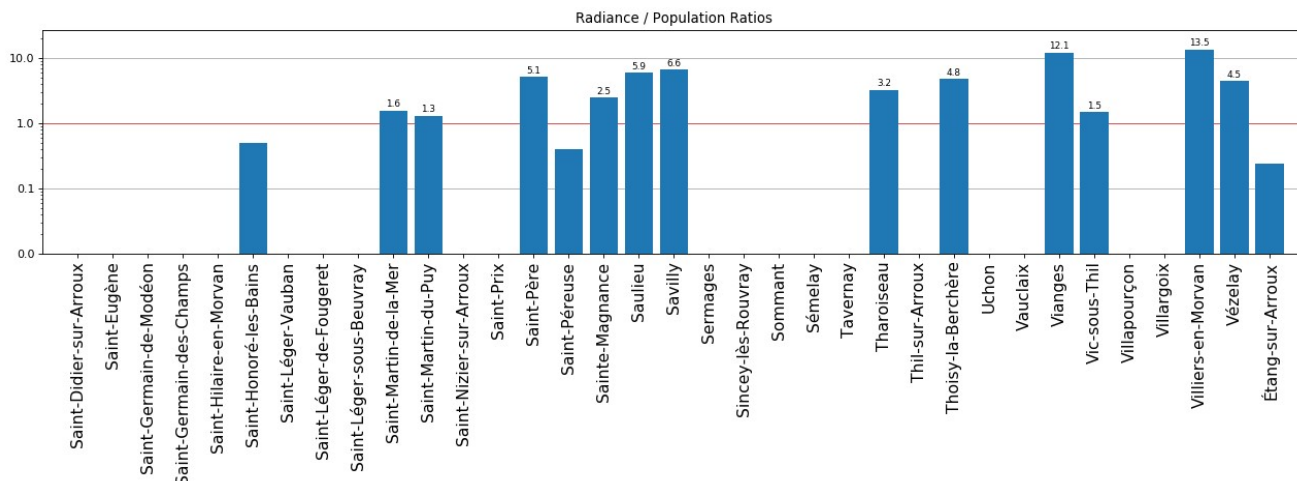
Radiance moyenn e annuellement sur la zone du barrage de Pannecière

On peut constater que la radiance du barrage est assez constante jusqu'en 2017. A partir de 2018 la radiance commence à faiblir (ampoules non remplac es ?) et qu'elle n'est plus du tout présente en 2020. On remarque aussi que la commune de Cervon s'est mise à pratiquer l'extinction en c eur de nuit à partir de 2016.

L'analyse des extinctions montr e sur la carte de radiance est confirm e à l'aide d'un outil développé par DarkSkyLab : celui-ci moyenne automatiquement les radiances autour des centres-bourgs et pondère les valeurs obtenues par les populations. Une heuristique d velopp e sur la base de nombreux cas d'étude permet alors d'évaluer l'existence d'extinctions en analysant les ratios radiance / population obtenus.

Les graphiques ci-dessous montrent les ratios obtenus pour les bourgs de la zone d'étude :

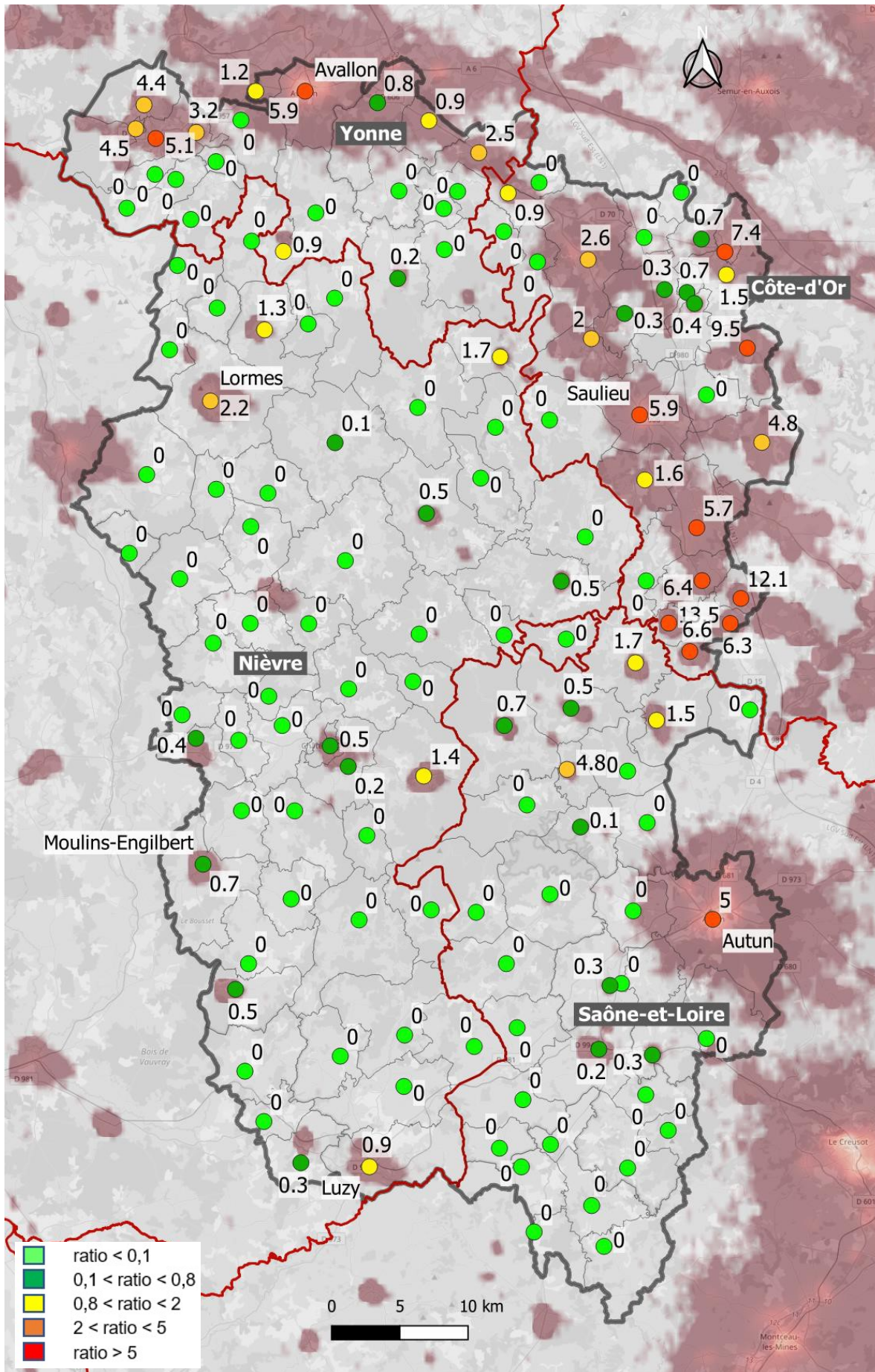




Selon l’heuristique développée par DarkSkyLab, tous les ratios qui ont une valeur inférieure à 1 (ligne rouge sur les graphiques) indiquent que les bourgs correspondants pratiquent une forme d’extinction. Un ratio nul signifie que l’extinction est totale et on peut constater sur le graphique qu’il y a un grand nombre de communes qui pratiquent ce type d’extinction sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan.

Certains ratios sont plus élevés, et ceux qui dépassent 10 méritent une attention particulière dans la mesure où cela peut indiquer possiblement du sur-éclairage sur certaines communes. Dans le cadre du PNR du Morvan, la plupart des communes avec des ratios élevés se situent sur la partie Côte-d’Or. Des petites communes telles que Villiers-en-Morvan et Vianges ont des ratios élevés (13,5 et 12,1) sans que cela ne puisse s’expliquer par la présence à proximité de communes plus importantes ou bien par l’implantation de sites industriels ou artisanaux. La commune de La Roche-en-Brenil possède un site industriel important, mais le ratio radiance / population au centre de la commune reste contenu.

Les ratios radiance / population sont représentés pour chaque bourg dans la carte ci-dessous avec le code couleur suivant : vert clair si le ratio est inférieur à 0,1, vert foncé s’il est compris entre 0,1 et 0,8, jaune s’il est compris entre 0,8 et 2, orange s’il est compris entre 2 et 5 et rouge s’il est supérieur à 5.



Ratios radiance / population associés aux bourgs sur l'empreinte du PNR (vert clair=ratio nul, vert foncé=faible ratio, jaune=ratio moyen, orange=ratio élevé, rouge=très fort ratio)

On remarque facilement sur la carte le grand nombre d’extinctions complètes (ratios à 0) sur l’ensemble du territoire du Parc naturel régional du Morvan ainsi que les ratios radiance / population plus élevés qui se situent essentiellement sur la partie Côte-d’Or. Il faut toutefois garder en tête que certaines radiances associées à de toutes petites communes ne sont pas forcément détectées par le satellite et il n’y a pas forcément une extinction en place sur ces communes. La liste des bourgs avec les ratios correspondants est fournie dans le tableau ci-dessous (les populations sont celles du recensement 2016) :

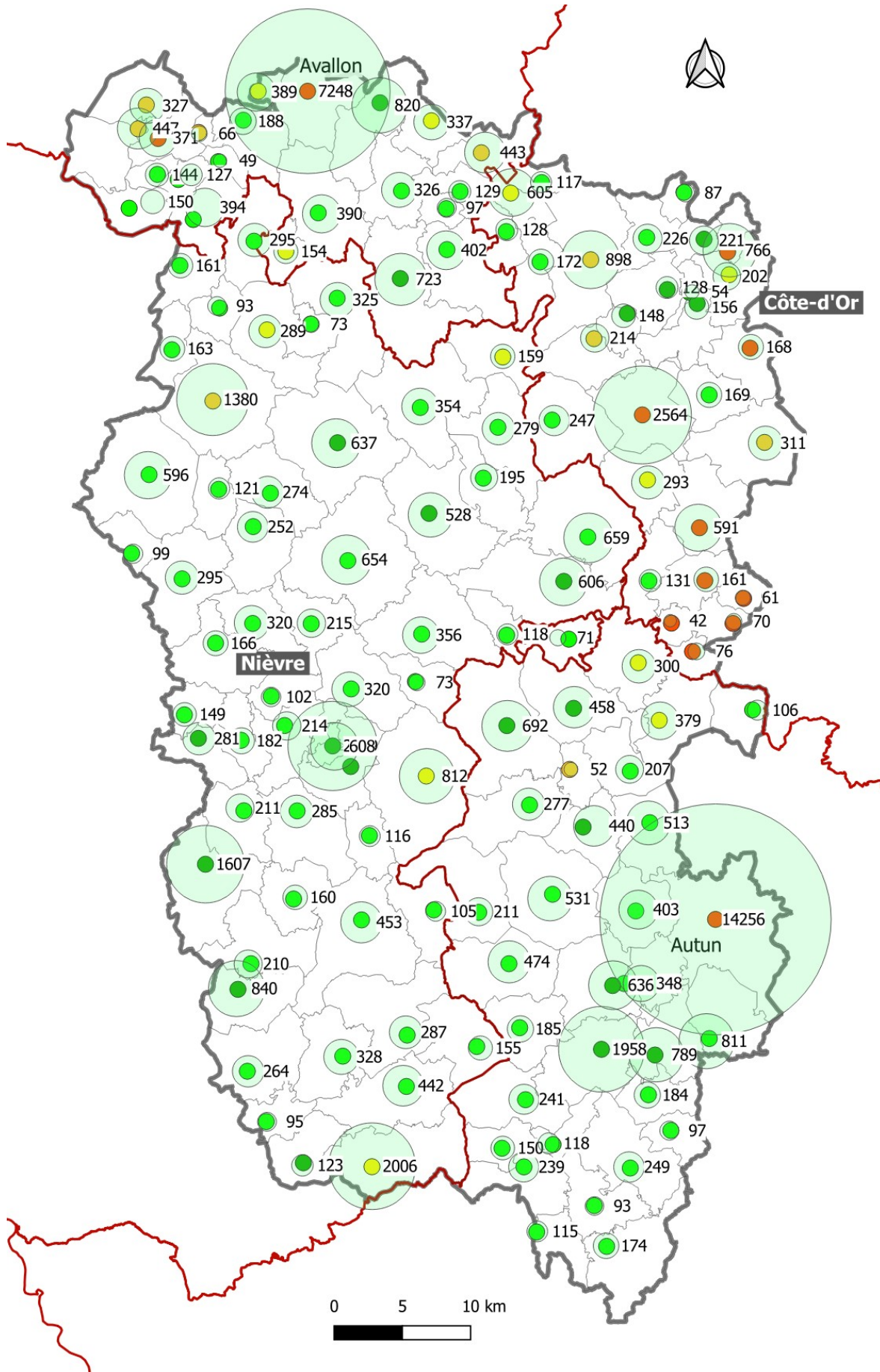
Bourg	Population	Ratio
Aisy-sous-Thil	281	0,71
Alligny-en-Morvan	651	0,00
Anost	725	0,72
Arleuf	809	1,36
Asquins	310	4,35
Autun	15212	5,05
Avallon	7413	5,88
Avrée	90	0,00
Bard-le-Régulier	75	6,30
Barnay	123	0,00
Bazoches	177	0,00
Beauvilliers	101	0,00
Blanot	129	0,00
Blismes	177	0,00
Brassy	653	0,15
Brazey-en-Morvan	146	6,41
Brion	329	0,00
Broye	759	0,04
Bussières	141	0,00
Cervon	619	0,00
Chaloux	79	0,00
Champeau-en-Morvan	255	0,00
Charbonnat	260	0,00
Chastellux-sur-Cure	151	0,89
Chaumard	212	0,00
Chiddes	341	0,00
Chissey-en-Morvan	288	1,67
Château-Chinon (Campagne)	602	0,22
Château-Chinon (Ville)	2457	0,54
Châtin	101	0,00
Corancy	322	0,00
Cussy-en-Morvan	458	0,47
Cussy-les-Forges	346	0,95
Dettey	89	0,00
Domecy-sur-Cure	425	0,00
Dommartin	184	0,00
Dompierre-en-Morvan	219	0,00
Dun-les-Places	355	0,00
Dun-sur-Grandry	176	0,00
Empury	79	0,00
Fléty	117	0,34
Foissy-lès-Vézelay	142	0,00
Fontenay-près-Vézelay	146	0,00
Fâchin	115	0,00
Gien-sur-Cure	100	0,00

Bourg	Population	Ratio
Menades	59	0,00
Mesvres	796	0,29
Mhère	244	0,00
Millay	458	0,00
Molphey	149	0,29
Monthelon	400	0,00
Montigny-Saint-Barthélemy	86	0,00
Montigny-en-Morvan	329	0,00
Montlay-en-Auxois	156	0,41
Montreuillon	294	0,00
Montsauche-les-Settons	543	0,51
Moulins-Engilbert	1543	0,73
Mouron-sur-Yonne	103	0,00
Moux-en-Morvan	576	0,49
Ménessaire	79	0,00
Onlay	162	0,00
Ouroux-en-Morvan	658	0,00
Pierre-Perthuis	136	0,00
Planchez	327	0,00
Poil	151	0,00
Pontaubert	409	1,16
Pouques-Lormes	167	0,00
Précy-sous-Thil	800	7,41
Préporché	202	0,00
Quarré-les-Tombes	718	0,21
Roussillon-en-Morvan	273	0,00
Rouvray	599	0,92
Saint-Agnan	158	1,70
Saint-Andeux	138	0,00
Saint-André-en-Morvan	294	0,00
Saint-Brancher	321	0,00
Saint-Brisson	281	0,00
Saint-Didier	215	2,02
Saint-Didier-sur-Arroux	248	0,00
Saint-Eugène	155	0,00
Saint-Germain-de-Modéon	169	0,00
Saint-Germain-des-Champs	382	0,00
Saint-Hilaire-en-Morvan	221	0,00
Saint-Honoré-les-Bains	825	0,50
Saint-Léger-Vauban	396	0,00
Saint-Léger-de-Fougeret	360	0,00
Saint-Léger-sous-Beuvray	407	0,00
Saint-Martin-de-la-Mer	307	1,56
Saint-Martin-du-Puy	282	1,30
Saint-Nizier-sur-Arroux	134	0,00

Glux-en-Glenne	104	0,00
Gouloux	188	0,00
Gâcogne	261	0,00
Island	193	0,00
Juillenay	58	0,72
La Boulaye	106	0,00
La Celle-en-Morvan	494	0,11
La Chapelle-sous-Uchon	188	0,00
La Comelle	198	0,00
La Grande-Verrière	548	0,00
La Motte-Ternant	174	9,49
La Petite-Verrière	53	4,79
La Roche-en-Brenil	908	2,62
La Tagnière	241	0,00
Lacour-d'Arcenay	135	0,27
Laizy	624	0,30
Larochemillay	257	0,00
Lavault-de-Frétoy	64	0,00
Liernais	612	5,74
Lormes	1350	2,19
Lucenay-l'Évêque	364	1,49
Luzy	2043	0,93
Magny	877	0,78
Marigny-l'Église	312	0,00

Saint-Prix	219	0,00
Saint-Père	340	5,14
Saint-Péreuse	276	0,39
Sainte-Magnance	468	2,48
Saulieu	2598	5,90
Savilly	81	6,55
Sermages	205	0,00
Sincey-lès-Rouvray	112	0,00
Sommant	216	0,00
Sémelay	252	0,00
Tavernay	503	0,00
Tharoiseau	66	3,22
Thil-sur-Arroux	151	0,00
Thoisyl-la-Berchère	323	4,81
Uchon	113	0,00
Vauclaix	131	0,00
Vianges	57	12,12
Vic-sous-Thil	201	1,48
Villapourçon	455	0,00
Villargoix	156	0,00
Villiers-en-Morvan	45	13,49
Vézelay	449	4,46
Étang-sur-Arroux	2082	0,24

Le nombre de communes avec un ratio radiance / population nul est impressionnant : **59% des communes semblent pratiquer une extinction totale**. Il faut possiblement retirer à ce ratio certaines toutes petites communes dont la radiance est trop faible pour être détectée. Toutefois, si l'on superpose les ratios radiance / population aux disques de population, on s'aperçoit que les toutes petites communes (moins de 100 habitants) ne sont pas si nombreuses que ça :



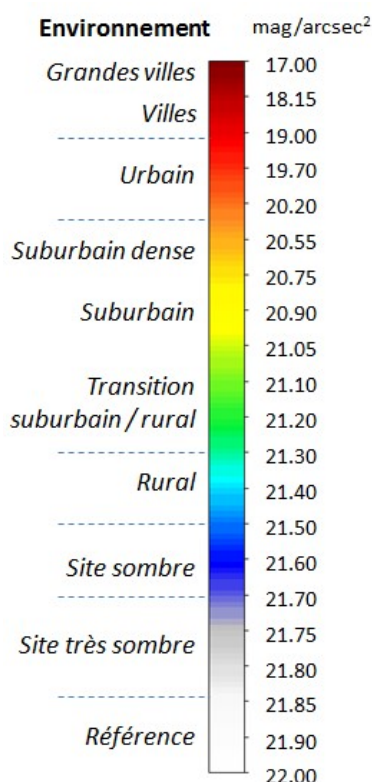
Superposition des ratios radiance / population aux populations des bourgs

4 Analyse des mesures de qualité de ciel

4.1 Le système Ninox

Afin de bien caractériser la qualité du ciel nocturne sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan, DarkSkyLab a fourni une plateforme pour mesurer la brillance du fond de ciel nocturne. Cette plateforme, appelée **Ninox**, opère de manière autonome et continue sans qu'aucune intervention ne soit nécessaire de la part d'un opérateur ni qu'une connexion Internet ne soit requise. Les données sont enregistrées nuit après nuit, à une fréquence d'environ une par minute, quelles que soient les conditions météorologiques. Après quelques jours ou semaines d'utilisation en un endroit donné sur le territoire, une plateforme Ninox doit être déplacée en un autre endroit pour le caractériser.

4.2 Définition de la brillance du fond de ciel



La brillance du fond de ciel nocturne, mesurée par Ninox, 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.

La figure ci-contre montre la correspondance entre les valeurs de NSB et les environnements 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. 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.

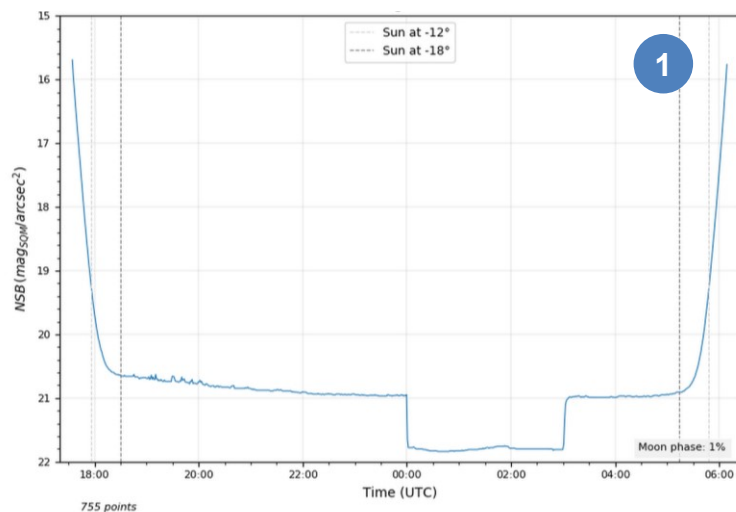
Les représentations des mesures Ninox montrées sur les cartes de ce document, ainsi que les cartes de simulation de la pollution lumineuse, utilisent cette même échelle de couleur, et il faut donc s'y référer pour interpréter correctement les résultats obtenus.

4.3 Interprétation des courbes Ninox

Cette section fournit des informations essentielles à la bonne interprétation des diagrammes produits à partir des mesures Ninox réalisées dans le périmètre du Parc naturel régional du Morvan et présentés dans ce document. Dans cette section, ainsi que dans le reste de ce document, le terme « TU » adossé à une heure signifie « Temps Universel ». Il faut ajouter une heure en hiver et deux heures en été pour obtenir l'heure locale correspondante.

4.3.1 Courbes unitaires

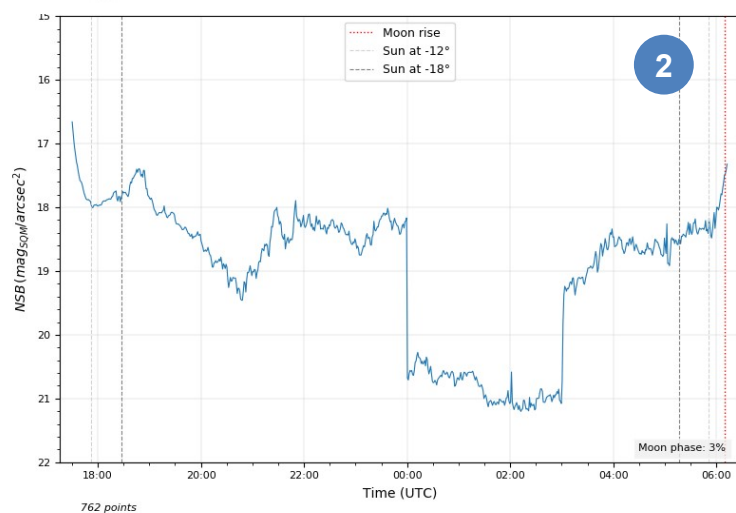
Les systèmes Ninox mesurent la brillance du fond de ciel au zénith toutes les minutes dès que le Soleil est à plus de 8° sous l'horizon. Cette brillance du ciel est appelée **NSB** pour *Night Sky Brightness* (voir le paragraphe 4.2).



A partir des données enregistrées sur une nuit, il est possible de tracer une courbe du NSB en fonction du temps.

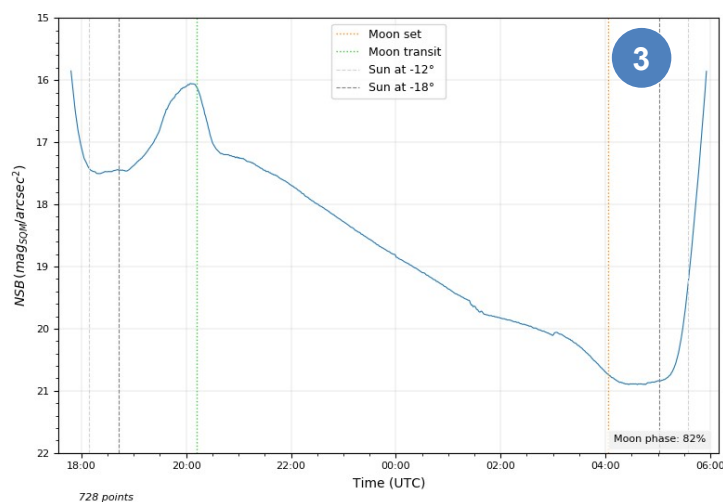
On voit par exemple sur la **courbe 1** ci-contre un assombrissement brusque du ciel (NSB plus élevé) en cœur de nuit du fait d'une extinction de l'éclairage public durant quelques heures. Sur ce type de diagramme, plus la courbe est lisse, plus le ciel est clair. Sur toutes les courbes, l'heure est exprimée en Temps Universel.

Il faut donc ajouter 1 heure en hiver et 2 heures en été pour avoir l'heure légale. Le profil de descente en début de nuit correspond au coucher du Soleil et le profil de montée en fin de nuit correspond au lever du Soleil.



La **courbe 2** montre une autre nuit au même endroit mais cette fois-ci en présence de nuages. L'extinction est toujours bien visible, mais le profil de la courbe est devenu très perturbé du fait des nuages. Ceux-ci agissent comme un amplificateur de la pollution lumineuse et la brillance du ciel est plus forte que lors des nuits claires (les niveaux de NSB sont moins élevés).

4.3.2 Influence de la Lune



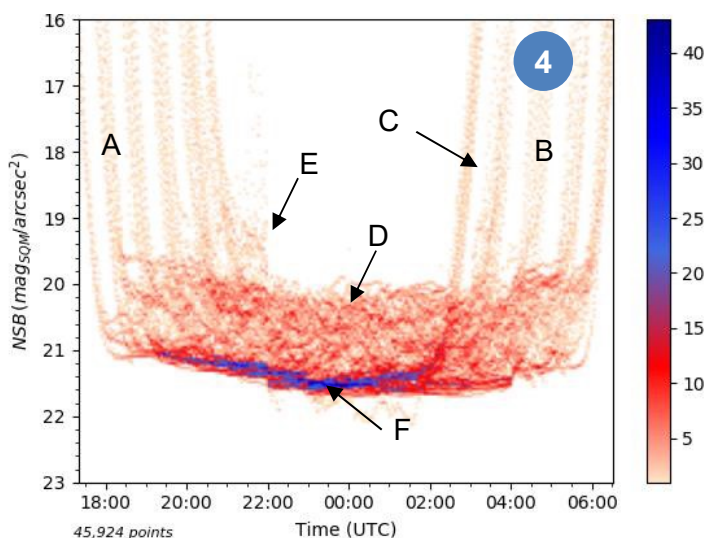
La Lune provoque un accroissement plus ou moins fort de la brillance du ciel selon sa phase, et on ignore généralement toutes les mesures réalisées en présence de la Lune lorsque l'on caractérise un site.

La **courbe 3** ci-contre montre par exemple une nuit de mesures en présence de la Lune avec une phase de 82% (donc très brillante). La Lune est au plus haut vers 22h TU et elle éclaire même directement le capteur du Ninox (d'où la petite bosse sur la courbe). Elle descend ensuite sur l'horizon et se couche vers 4h TU. On peut constater que la Lune modifie radicalement la brillance du ciel.

4.3.3 Analyse statistique des mesures Ninox

Les conditions atmosphériques varient grandement de nuit en nuit sur un même site (nuages avec des densités et des altitudes différentes, présence plus ou moins grande d’humidité et d’aérosols dans l’atmosphère, etc.), et il est donc important, pour bien caractériser un site, de mesurer la brillance de ciel dans ces diverses conditions.

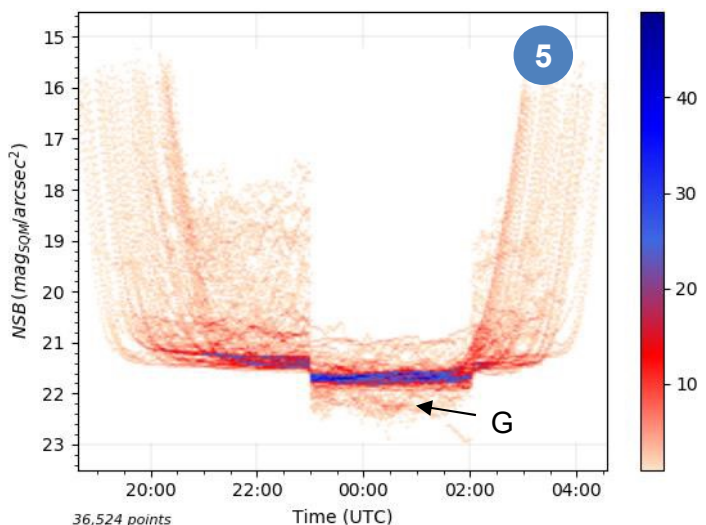
Pour visualiser un grand nombre de nuits de mesures sur un même site, on utilise un diagramme spécial appelé histogramme de densité. Toutes les nuits de mesures sont ramenées à une seule nuit « virtuelle » et superposées sur un diagramme avec le temps sur l’axe horizontal et la brillance du ciel (le NSB) sur l’axe vertical. Seules les mesures sans présence de la Lune sont utilisées. Chaque pixel dans le diagramme représente le nombre d’occurrences d’une combinaison particulière d’un temps TU et d’une valeur de NSB et ce nombre d’occurrences est codé avec une couleur spécifique.



Sur l’**histogramme de densité 4** ci-contre, les valeurs de NSB les plus fréquentes apparaissent en bleu sombre et les moins fréquentes en rouge clair. On voit en A les profils de descente de la brillance du ciel en début de nuit et en B les profils de montées à l’aube.

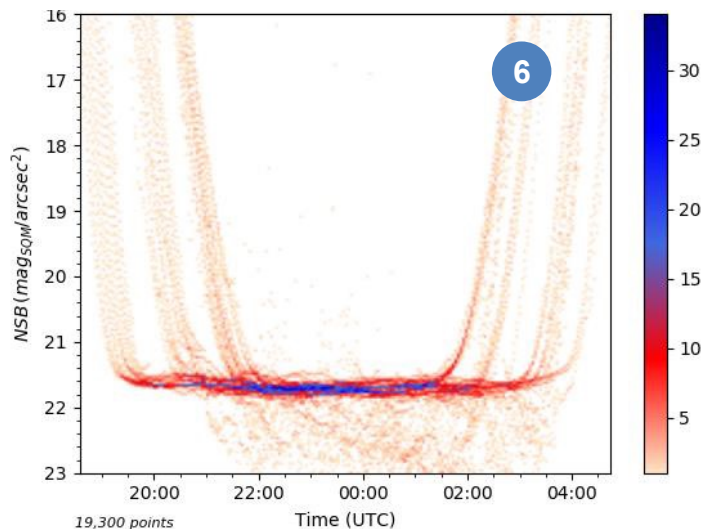
La durée des nuits varie au cours du temps et les intervalles vides comme celui en C représentent les nuits où la Lune était présente et pour lesquelles les mesures ne sont pas reportées.

Les mesures situées dans la zone D sont celles réalisées en présence de nuages qui amplifient la pollution lumineuse et donc diminuent les niveaux de NSB (on a donc des points plus hauts dans le diagramme). Une extinction est visible en E, et la zone de surdensité en F montre quelle est la brillance de ciel typique que l’on peut atteindre par ciel clair en cœur de nuit (il s’agit du plateau de ciel clair).



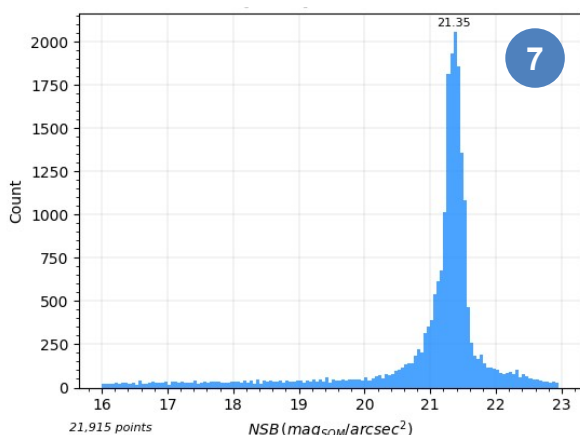
Chaque site possède ses propres niveaux et caractéristiques. Le **diagramme 5** ci-contre montre un site où une forte extinction provoque un écroulement de l’étendue de NSB et une forte amélioration de la qualité de ciel.

On peut voir sur ce site qu’en cœur de nuit après extinction, certaines conditions nuageuses provoquent un assombrissement du ciel (il devient plus sombre que par temps clair) : certaines mesures sont situées en-dessous du plateau de ciel clair (en G).

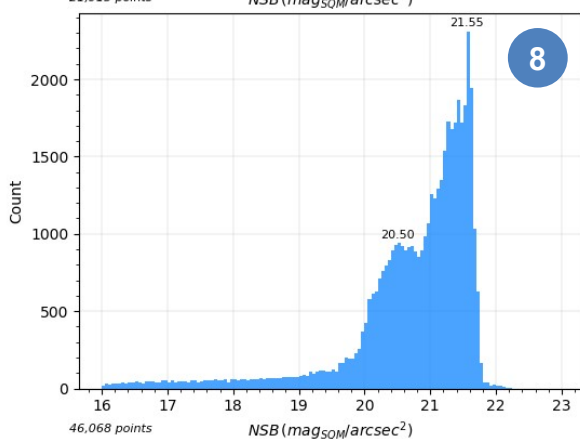


Sur certain site de très bonne qualité, on obtient un plateau de ciel clair très bas et des conditions systématiques d'assombrissement du ciel par temps nuageux. C'est le cas par exemple pour le site du **diagramme 6** ci-contre où les valeurs de brillance du ciel par temps couvert sont systématiquement en-dessous du plateau de ciel clair.

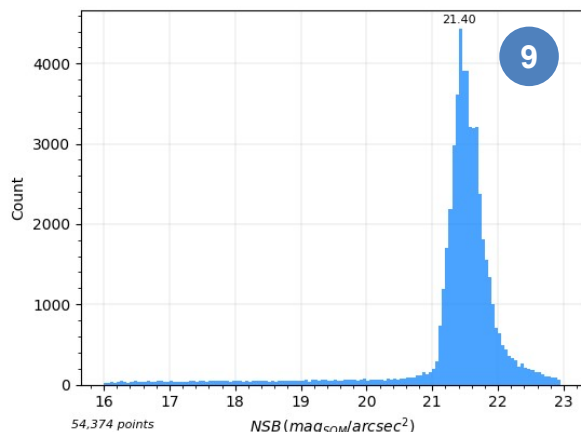
Une autre façon de visualiser les valeurs de NSB correspondant à différentes conditions atmosphériques est de construire des histogrammes de magnitude. Sur ces diagrammes, on trace des barres verticales qui témoignent de la fréquence d'apparition des différentes valeurs de NSB positionnées quant à elles sur l'axe horizontal.



La plupart des histogrammes de magnitude font apparaître un pic élevé sur la droite du diagramme comme cela est montré dans la **figure 7** ci-contre. Ce pic définit le NSB de référence du site par conditions moyennes de ciel clair. Il ne s'agit pas du meilleur NSB obtenu sur le site (qui se situe plus sur la droite), mais plutôt d'un NSB nominal moyen qui apparaît de manière fréquente par ciel clair. Plus le pic de ciel clair est à droite, meilleure est la qualité du site.



Les sites peu pollués n'ont qu'un pic dans leur histogramme (pic de ciel clair) alors que les sites plus pollués font apparaître des pics sur la gauche du pic de ciel clair qui correspondent aux conditions de ciel couvert les plus fréquentes. Un exemple d'un tel pic secondaire de ciel couvert est montré dans le **diagramme 8**. Plus la partie gauche des histogrammes est peuplée (forte luminance par conditions de ciel couvert), plus la pollution lumineuse relevée sur le site est importante.



Si certains sites possèdent un ou plusieurs pics en partie droite ou bien une traîne importante à droite du pic principal (comme montré sur le **diagramme 9**), cela peut signifier que l'étendue de NSB est inversée et que la zone de ciel couvert est placée plus à droite (zone plus sombre) que le pic de ciel clair. Cela est typique des sites de qualité qui s'assombrissent en présence de nuages.

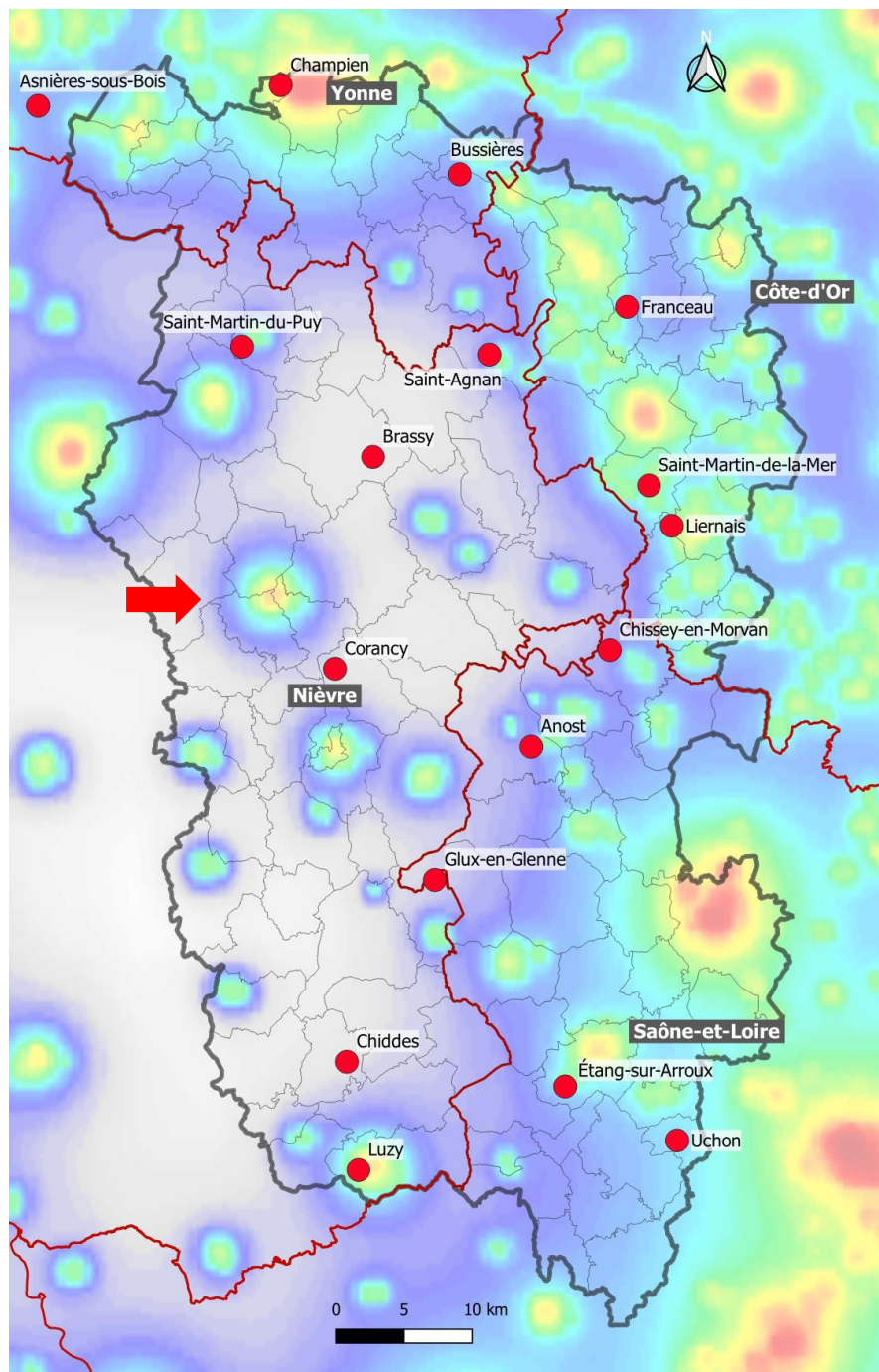
4.4 Mesures réalisées sur le terrain

Un programme de mesures de la luminosité du fond de ciel au zénith a été initié dans le périmètre du Parc naturel régional du Morvan à l'aide de 7 systèmes **Ninox** fournis par DarkSkyLab (4 au maximum ont été utilisés en parallèle durant la campagne de mesures). Ces mesures ont été réalisées sur 17 sites différents entre le 17 octobre 2019 et le 5 décembre 2020.

Le tableau ci-dessous résume les mesures Ninox réalisées sur le terrain :

Lieu	Ninox	Nuits	Première nuit	Dernière nuit	Enregistrements
Anost	Ninox070	29	17/10/2019	15/06/2020	12 569
Asnières-sous-Bois	Ninox060	16	21/11/2019	06/12/2019	12 969
Brassy	Ninox073	37	09/07/2020	14/08/2020	15 977
Bussières	Ninox024	17	21/12/2019	25/01/2020	13 171
Champien	Ninox060	21	29/10/2019	18/11/2019	15 306
Chiddes	Ninox062	123	29/10/2019	09/05/2020	79 468
Chissey-en-Morvan	Ninox029	49	29/09/2020	24/11/2020	34 469
Corancy	Ninox075	53	21/01/2020	18/06/2020	29 316
Franceau	Ninox024	7	22/10/2019	28/10/2019	4 914
Glux-en-Glenne	Ninox070	163	19/06/2020	05/12/2020	95 978
Liernais	Ninox024	27	19/11/2019	19/12/2019	19 532
Luzy	Ninox062	29	20/05/2020	19/06/2020	11 284
Saint-Agnan	Ninox060	4	25/10/2019	28/10/2019	2 928
Saint-Martin-de-la-Mer	Ninox024	15	31/10/2019	14/11/2019	11 199
Saint-Martin-du-Puy	Ninox075	46	21/07/2020	04/10/2020	26 857
Uchon	Ninox073	43	22/08/2020	03/10/2020	25 332
Étang-sur-Arroux	Ninox075	25	01/07/2020	10/08/2020	10 563

La campagne de mesures représente donc pour l'instant un total de **704 nuits** de mesures sur **17 sites** différents et plus de **420 000 mesures** individuelles. Cette campagne de mesure de la luminance du ciel est tout à fait exceptionnelle, et seul le Parc naturel régional Périgord-Limousin a connu une campagne de la même ampleur, toujours en utilisant des systèmes Ninox.



Sites de mesure Ninox sur une carte de pollution lumineuse réalisée à partir de radiances satellite d'un jeu composite annuel 2015

La carte ci-contre montre les 17 sites de mesure Ninox (points rouges) avec en fond la carte de pollution lumineuse obtenue par simulation à partir de données de radiance satellite (jeu composite annuel 2015) par des conditions moyennes de ciel clair et en cœur de nuit.

Une carte de pollution lumineuse représentative de la situation en 2015 a été choisie afin de montrer la situation il y a 5 ans et la comparer à la situation de 2019 (qui est montrée sur les cartes de pollution lumineuse plus loin dans le document).

Les limites du Parc naturel régional du Morvan sont tracées sur la carte avec un trait gris sombre (chartre 2020-2035 du PNR) et les limites des départements sont tracées en rouge.

On peut constater que le territoire du PNR est couvert de manière particulièrement homogène avec des sites dans les zones les plus sombres, d'autres sur la limite centrale du Parc où s'opère a priori un changement de qualité de ciel et enfin certains points dans la partie plus exposée aux nuisances lumineuses à l'est du Parc.

Il est à remarquer que dans la simulation de la pollution lumineuse utilisée dans la carte ci-dessus, la radiance associée aux lampadaires boules du barrage du lac de Pannecière n'a pas été supprimée (on utilise des données de radiance 2015). Il est impressionnant de constater l'impact que peuvent avoir quelques dizaines de lampadaires boules en termes de pollution lumineuse (flèche rouge sur la carte ci-dessus). La photo ci-dessous montre ces lampadaires boules sur la route au-dessus du barrage. On comprend mieux en voyant cette photo pourquoi la radiance associée à ces dispositifs induit un impact important en termes de pollution lumineuse.

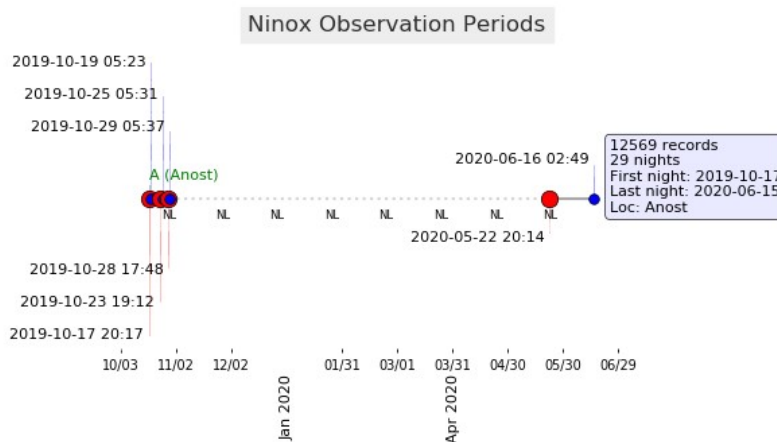


Lampadaires boule sur le barrage de Pannecière

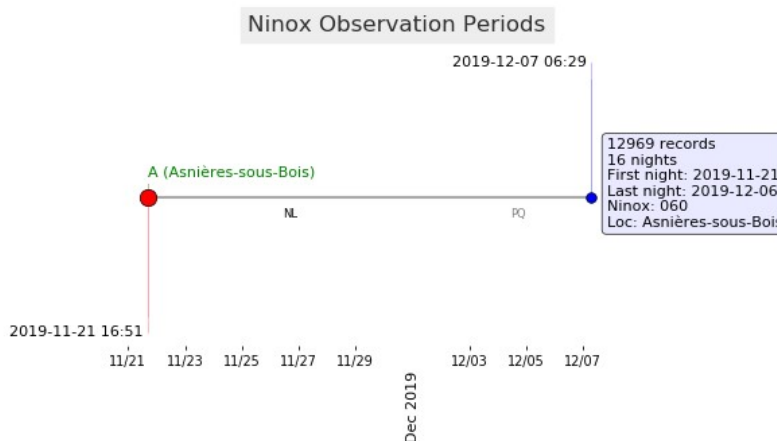
Les diagrammes ci-dessous permettent de visualiser les périodes de mesure pour chacun des sites (les points rouges sur les diagrammes correspondent au début d'une période de mesure et les points bleus à la fin d'une période). Les cycles lunaires sont indiqués sur les lignes de temps :

- **NL** pour *nouvelle Lune* (c'est-à-dire une absence de Lune durant toute la nuit, ce qui représente les conditions les plus favorables pour réaliser des mesures Ninox significatives) ;
- **PQ** pour *premier quartier* ;
- **PL** pour *pleine Lune* (aux alentours de cette période, quasiment aucune mesure Ninox n'est retenue puisque la Lune est présente durant toute la nuit dans le ciel) ;
- **DQ** pour *dernier quartier*.

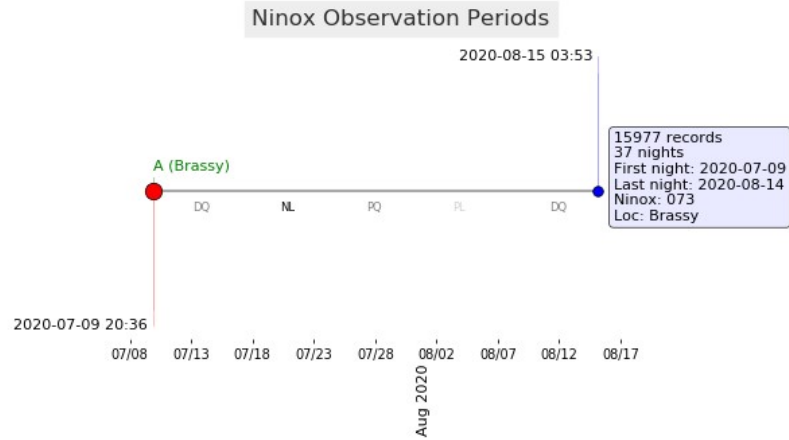
Anost



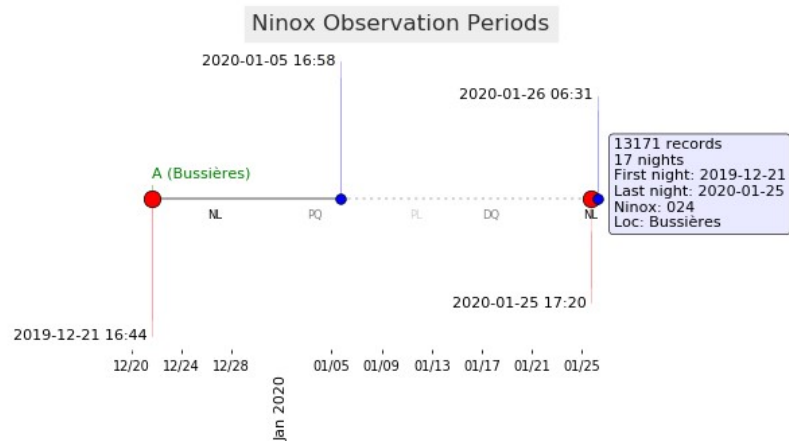
Asnières-sous-Bois



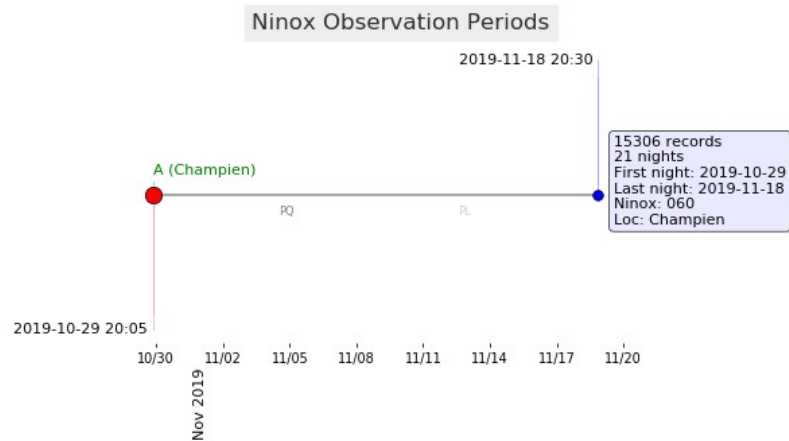
Brassy



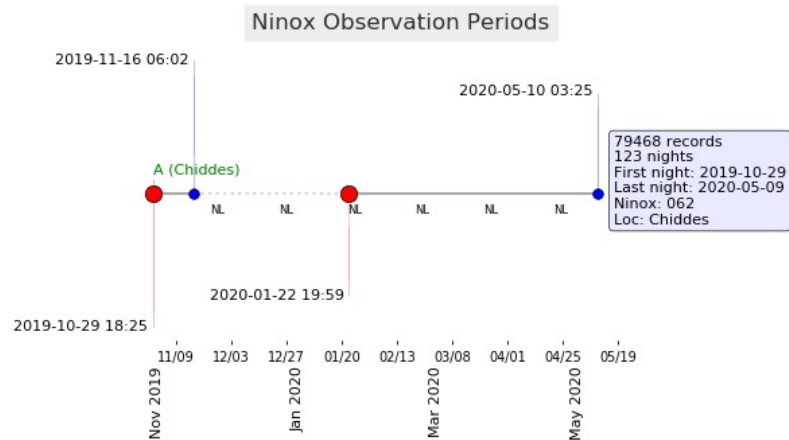
Bussières



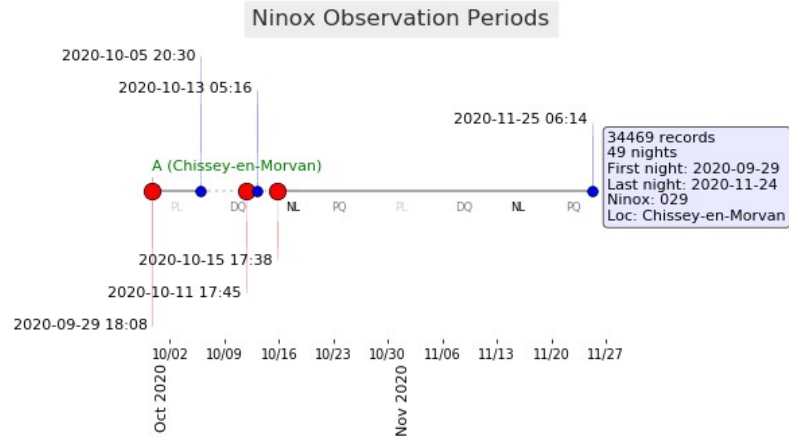
Champien



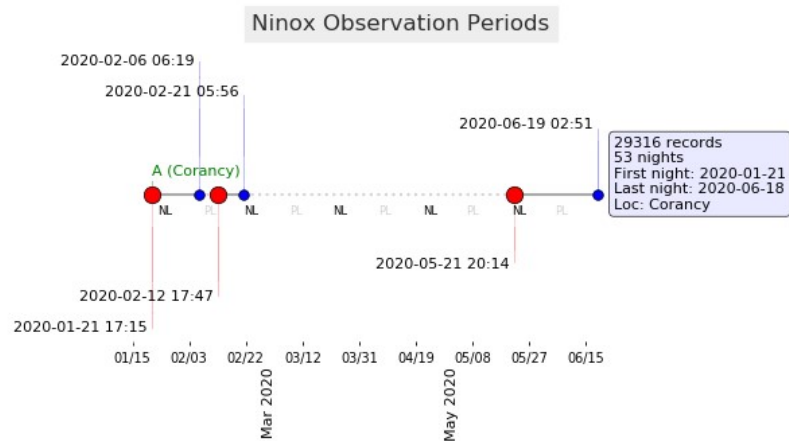
Chiddes



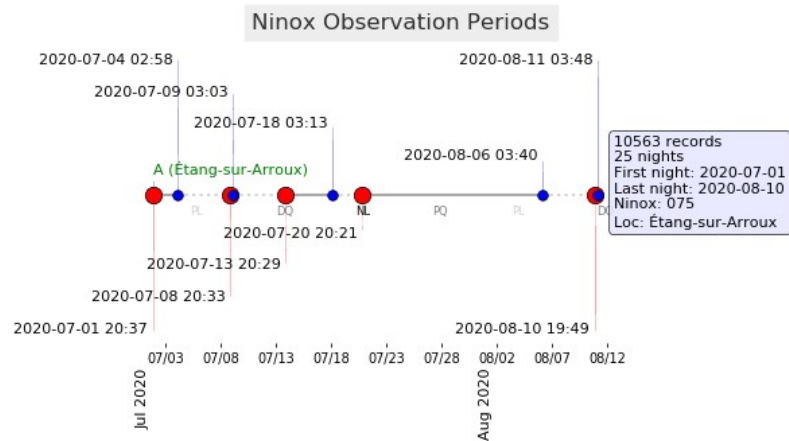
Chissey-en-Morvan



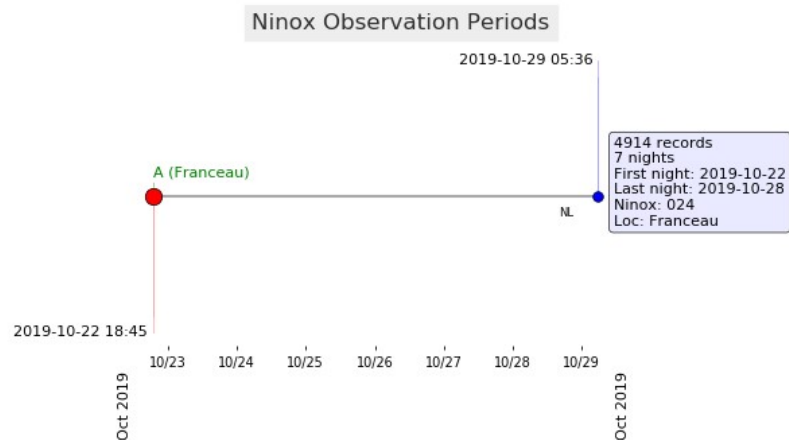
Corancy



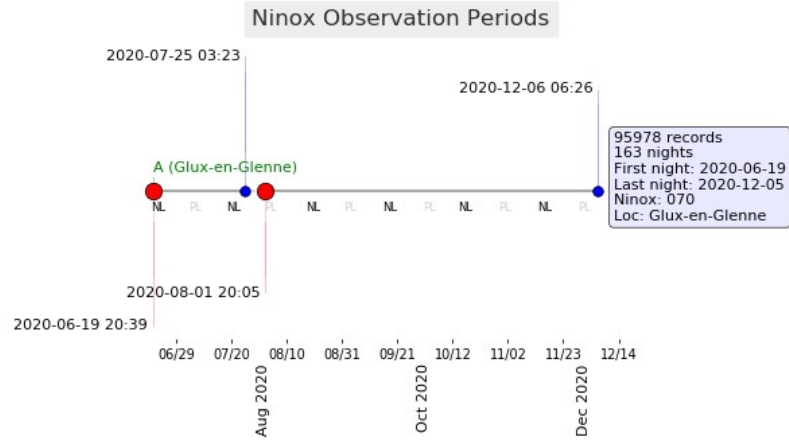
Étang-sur-Arroux



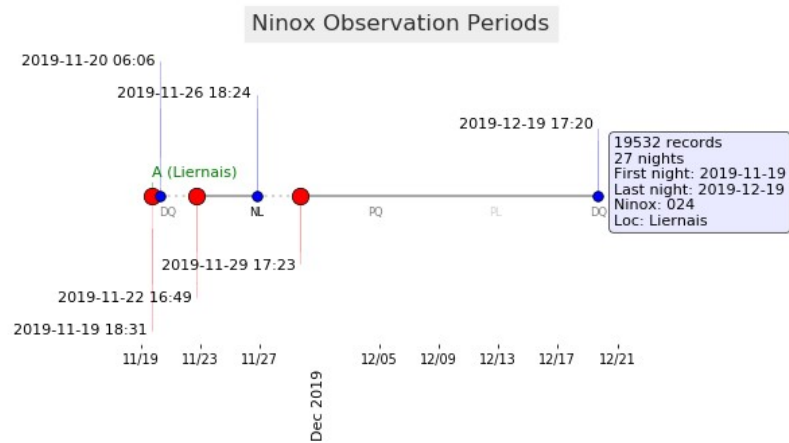
Franceau



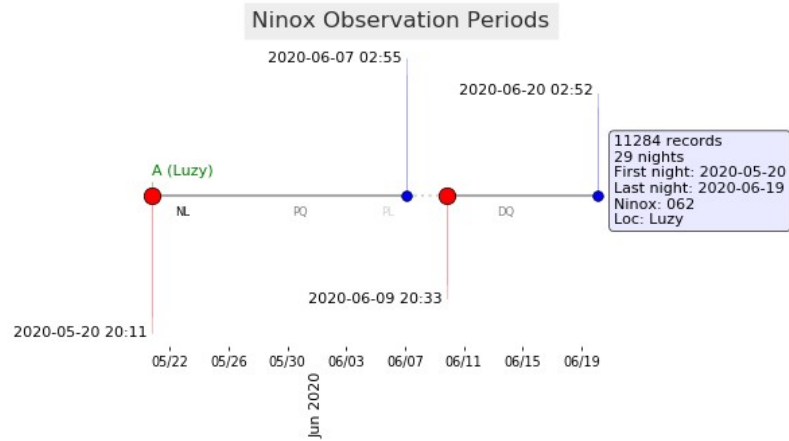
Glux-en-Glenne



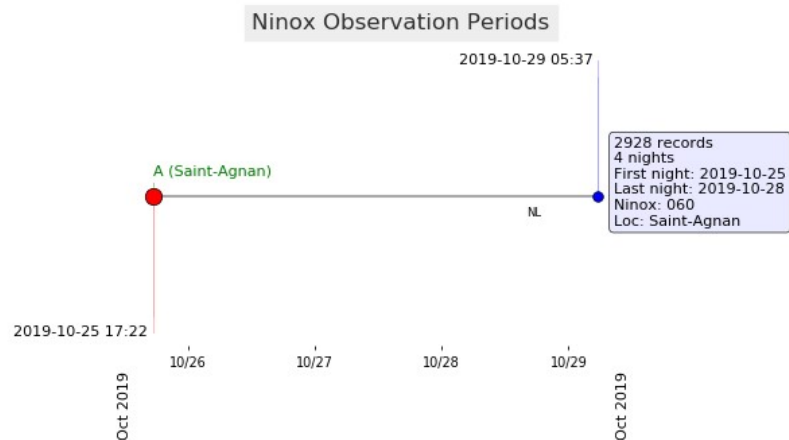
Liernais



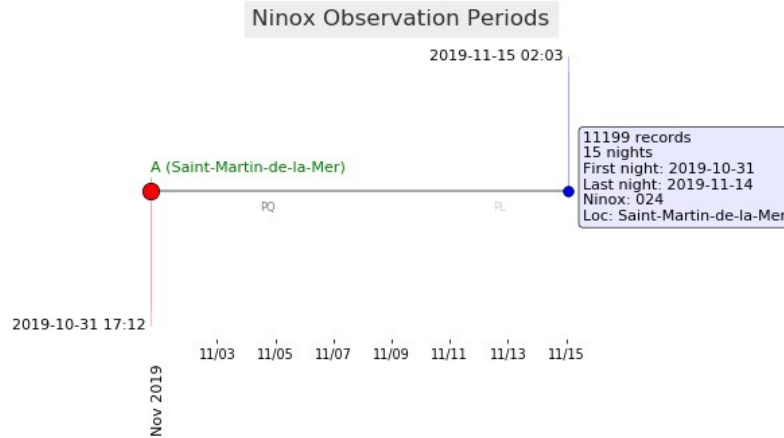
Luzy



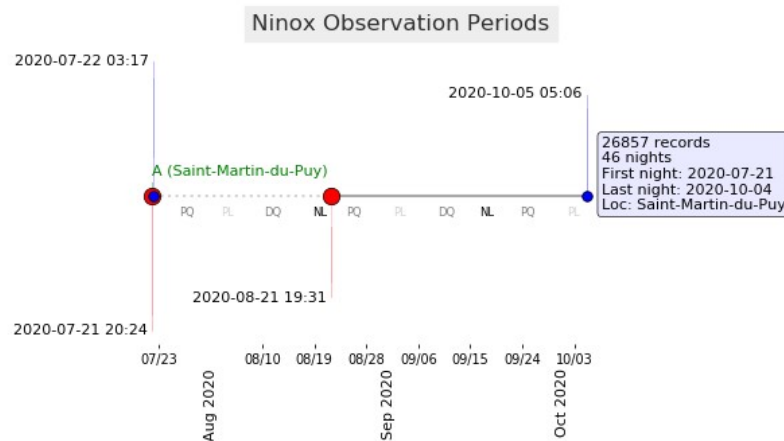
Saint-Agnan



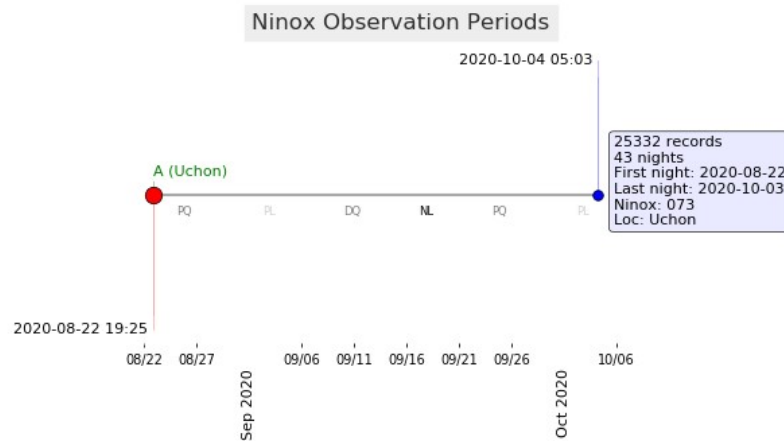
Saint-Martin-de-la-Mer



Saint-Martin-du-Puy



Uchon



On peut constater que les périodes de mesure sont assez contrastées sur les différents sites avec certaines périodes très longues et d'autres plus courtes avec en particulier des interruptions de mesure (liées pour la plupart à des déconnexions électriques du fait de la présence d'animaux par exemple).

4.5 Diagrammes pour les différents sites

Les paragraphes suivants montrent pour chacun des 5 sites les diagrammes qui permettent leur caractérisation en termes de qualité de ciel :

1. L'histogramme de densité de NSB² (sans présence de la Lune)
2. L'histogramme de magnitude (sans présence de la Lune)

4.5.1 Histogrammes de densité

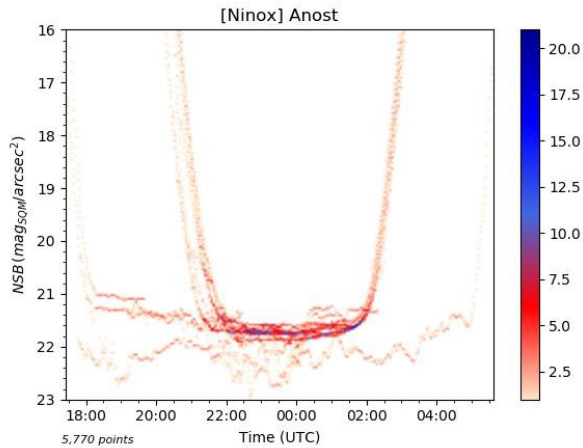
D'un point de vue statistique, les valeurs de NSB en cœur de nuit sont essentiellement déterminées en traçant pour chaque site un **histogramme de densité** (voir ci-dessous). Ce type de diagramme montre l'ensemble des mesures réalisées en un site donné sans tenir compte du fait que le ciel soit dégagé ou non. Toutes les nuits de mesure sont ramenées sur une seule période (par exemple entre 17:00 TU et 07:00 TU sur l'axe horizontal) et la plage de NSB sur l'axe vertical est la même pour tous les histogrammes. Elle va de 16 mag/arcsec² (ciel plus brillant) à 23 mag/arcsec² (ciel plus sombre). On ne considère toutefois que les mesures réalisées quand la Lune n'est pas visible dans le ciel, ceci afin d'évaluer uniquement l'impact de la lumière d'origine anthropique.

Sur les histogrammes, les zones de densité les plus basses correspondent généralement aux conditions de ciel clair et celles les plus élevées correspondent à la présence de nuages éclairés par la lumière émise à courte et moyenne distance. Les nuages jouent en effet un rôle d'amplification de la pollution lumineuse sur les courtes échelles. L'étendue de la « plage de densité » sur les histogrammes témoigne donc directement du niveau de pollution lumineuse induit par l'éclairage local. Dans le cas des sites de qualité, il est fréquent que l'**étendue de NSB** soit inversée et que les zones de densité les plus basses correspondent aux nuits de ciel couvert. Cela s'explique par le fait que ces sites sont peu impactés par la pollution lumineuse et que la présence de nuages a donc tendance à les assombrir en bloquant la lumière naturelle du ciel (photoluminescence du ciel, contribution des étoiles et de la Voie lactée, etc.). Dans le cadre de cette étude, c'est le cas pour de nombreux sites sur lesquels des mesures ont été réalisées. Cela indique que ces sites disposent d'une qualité de ciel suffisante pour faire apparaître ce phénomène.

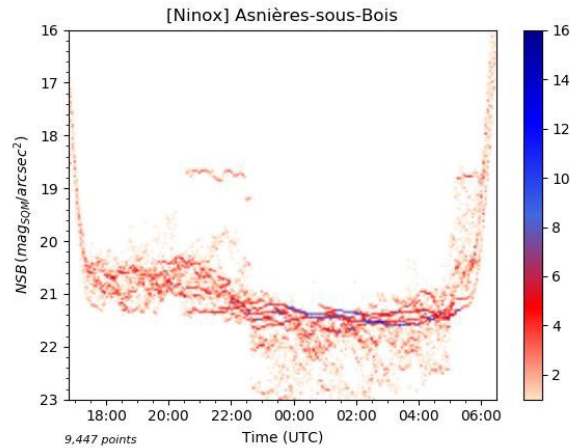
En cas d'extinction de sources proches ou à moyenne distance, on voit apparaître des décrochages brusques dans les zones de densité de ce type d'histogrammes. C'est le cas pour le site de Chiddes où un décrochage massif est observé.

On remarque aussi sur plusieurs histogrammes de densité un profil de descente en début de nuit suivi d'une remontée en fin de nuit. Ce profil n'est pas lié à la présence de la Voie lactée (qui peut provoquer d'importantes variations de luminance de ciel au cours de la nuit selon sa position par rapport au zénith) puisque la contribution de la Voie lactée a été corrigée dans les histogrammes. Cela est dû à la diminution de l'activité humaine à moyenne et longue distance puis à une reprise de cette activité (éclairage privé, circulation automobile, publicités lumineuses, éclairage des commerces, etc.). Cela inclut aussi les extinctions en début de nuit et les rallumages en fin de nuit des communes à moyenne distance des lieux de mesure (sachant qu'elles sont particulièrement nombreuses sur le territoire du PNR). Pour chacun des histogrammes, un bref commentaire est fourni.

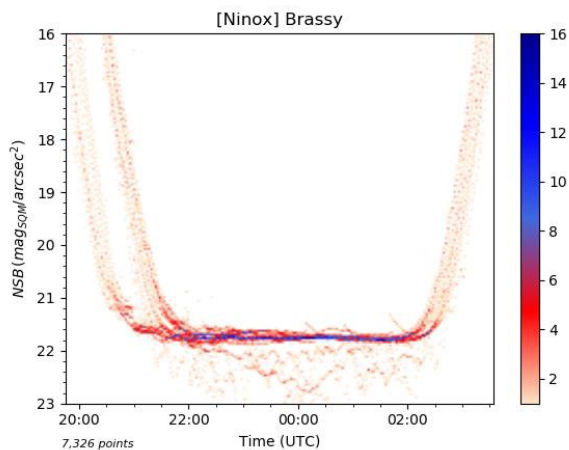
² Le NSB (*Night Sky Brightness*) mesure la luminance du fond de ciel et est exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré (mag/arcsec²). Cette unité est celle d'une luminance et il s'agit d'une mesure logarithmique dérivée de la magnitude photométrique largement utilisée en astronomie (inspirée de la vision humaine). Sur cette échelle, les valeurs les plus élevées correspondent aux brillances les plus faibles.



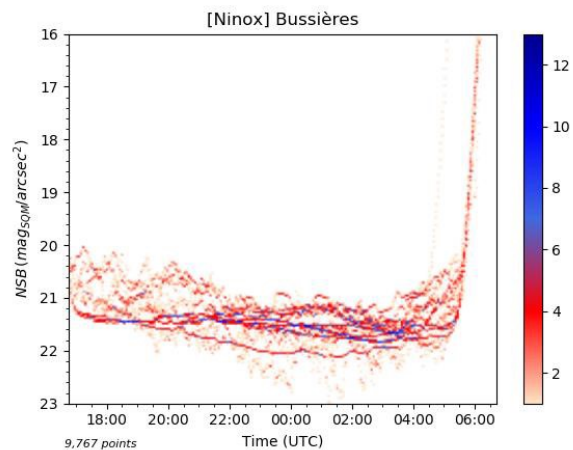
Il y a eu peu de mesures sur 2 périodes très différentes sur le site d'Anost comme le montre la forte variation de durée de la nuit. On a toutefois suffisamment de données pour caractériser le NSB en cœur de nuit.



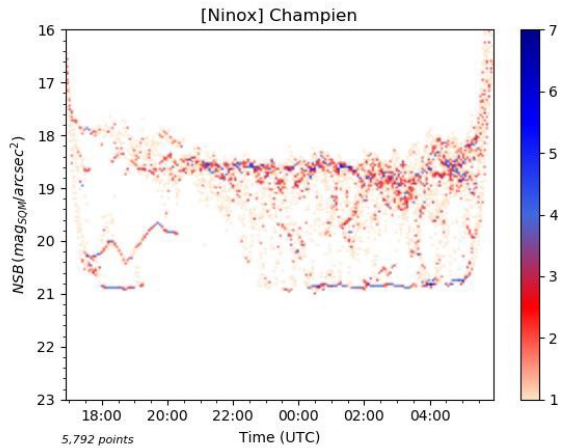
Il y a eu peu de nuits claires sans Lune pour les mesures sur le site d'Asnières-sous-Bois. On voit de manière très marquée les bénéfices d'une extinction locale à 22h30 TU (suivie d'un rallumage à 5h00 TU) : l'étendue de NSB qui était positive s'inverse brutalement et on atteint une bonne valeur de 21,50 mag/arcsec² en cœur de nuit. On remarque aussi un profil de descente caractéristique au cours de la nuit lié en partie à la diminution de l'activité humaine à moyenne distance et aux extinctions des communes voisines.



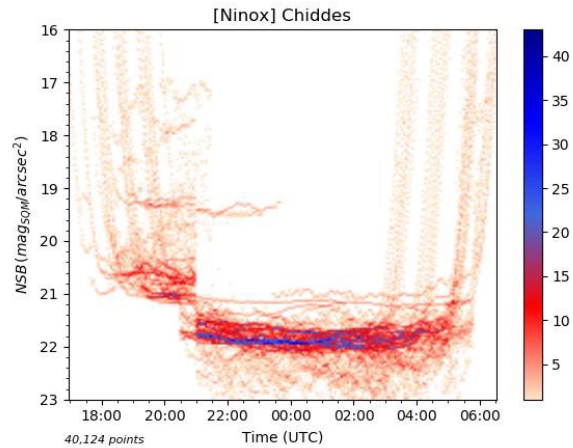
Le site de Brassy est très bien caractérisé et très propre avec une inversion de l'étendue de NSB bien nette. Les conditions météo se sont bien prêtées au relevé Ninox sur une durée d'un peu plus d'un mois.



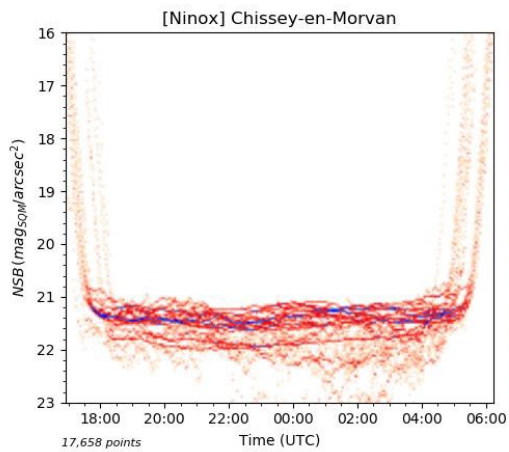
Un problème de paramétrage du système Ninox a décalé légèrement les courbes sur le site de Bussières. On peut voir que l'étendue de NSB est assez faible sur toute la période sans Lune, ce qui témoigne d'une bonne qualité de site. Le profil le plus bas sur le diagramme correspond à des conditions de neige (qui s'est déposée sur le hublot du Ninox).



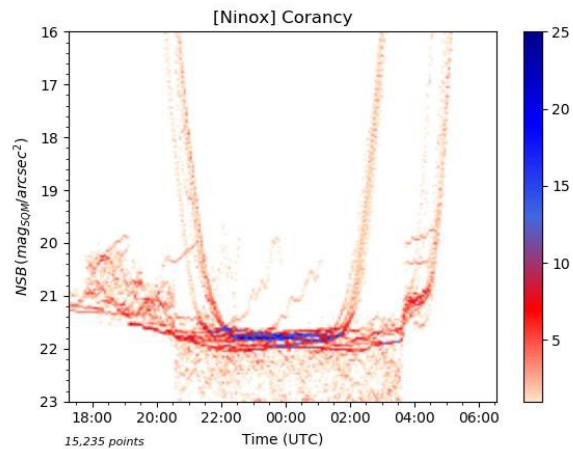
On manque de données sur le site de Champien. Une nuit partiellement claire permet cependant d'évaluer le NSB en cœur de nuit. L'étendue de NSB est très importante ce qui, outre le meilleur NSB médiocre obtenu (20,80 mag/arcsec²) témoigne de la proximité d'une source importante de pollution lumineuse, en l'occurrence la ville d'Avallon.



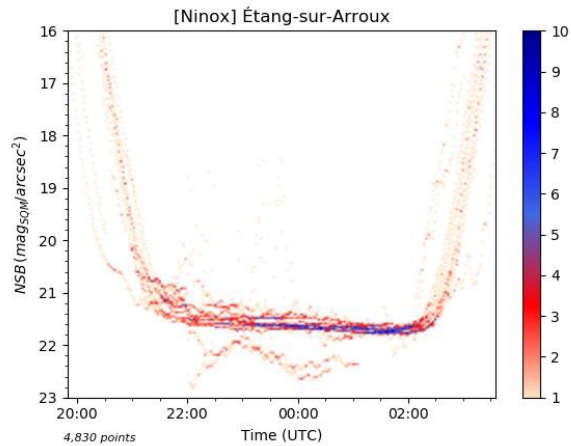
Le site de Chiddes bénéficie d'une extinction massive à proximité ce qui améliore drastiquement la qualité de ciel à partir de 21h00 TU. Une fois l'extinction réalisée, l'étendue de NSB s'inverse et durant les nuits claires on atteint d'excellentes valeurs de NSB de l'ordre de 21,85 mag/arcsec² au mieux, ce qui correspond à un ciel très sombre. Le profil isolé et lisse plus haut que les autres (autour de 21 mag/arcsec²) en cœur de nuit correspond à une nuit claire sans que l'extinction n'ait été réalisée. On peut alors mesurer directement les bénéfices d'une extinction...



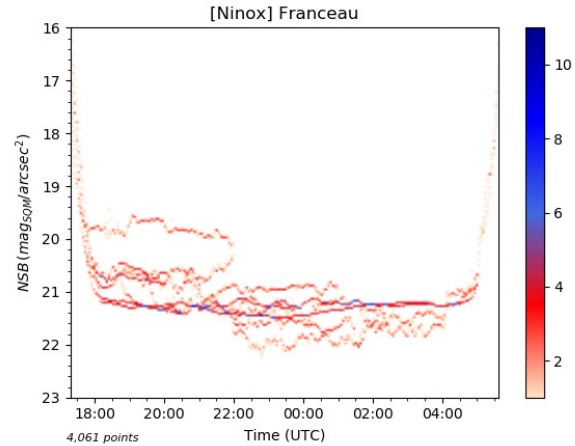
Sur le site de Chissey-en-Morvan, un éclairage local permanent a réhaussé artificiellement les luminances mesurées sauf durant quelques nuits durant lesquelles on peut évaluer le NSB en cœur de nuit.



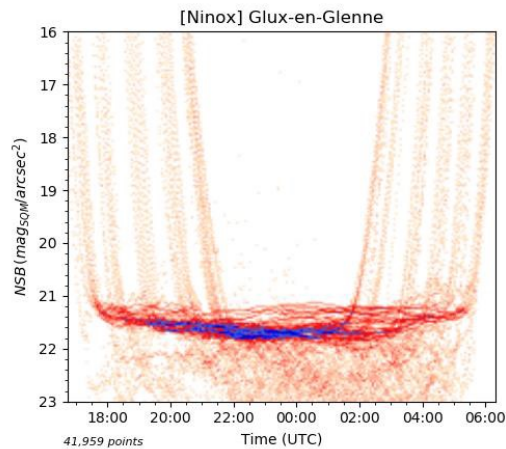
Le profil de descente en début de nuit des lignes de nuit claire (niveaux les plus bas) est lié principalement à une diminution de l'activité humaine des agglomérations proches du site de Corancy et aux extinctions des communes voisines. Une extinction locale est bien visible peu avant 21h00 TU qui provoque une inversion de l'étendue de NSB. On atteint alors d'excellents niveaux de NSB par nuit claire de l'ordre de 21,80 mag/arcsec².



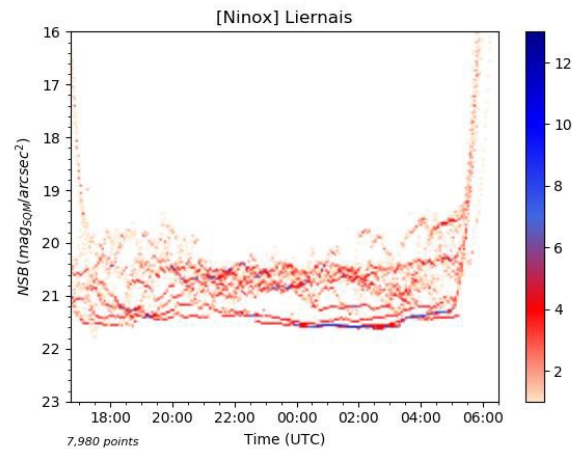
Il y a eu assez peu de mesures sur le site d'Étang-sur-Arroux, mais il est toutefois bien caractérisé. On observe une inversion de l'étendue de NSB et un profil de descente au cours de la nuit.



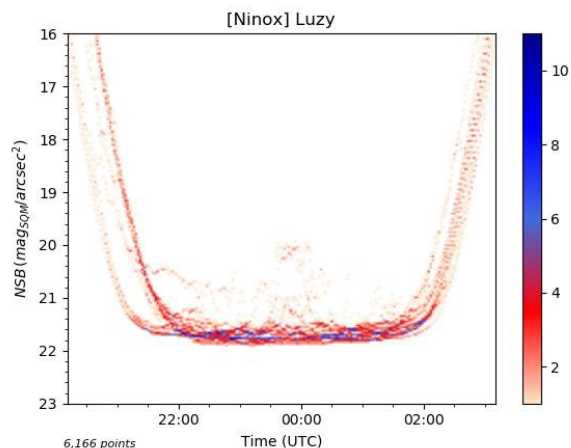
On manque de mesures sur le site de Franceau mais il y a une belle nuit claire qui a permis de réaliser une caractérisation minimale. On atteint un NSB moyen en cœur de nuit de 21,20 mag/arcsec² ce qui témoigne d'un environnement qui n'est pas indemne de pollution lumineuse.



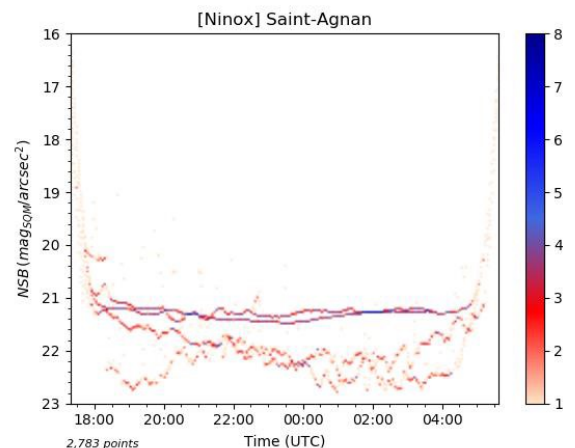
Le site de Glux-en-Glenne a bénéficié d'un grand nombre de nuits de mesures et est extrêmement bien caractérisé. Il bénéficie d'un ciel d'excellente qualité qui pâtit seulement dans certaines conditions nuageuses de la pollution lumineuse d'Autun. Depuis mi-octobre, un phénomène pas encore totalement expliqué a fait remonter les niveaux de luminance (lignes au-dessus de la zone de densité).



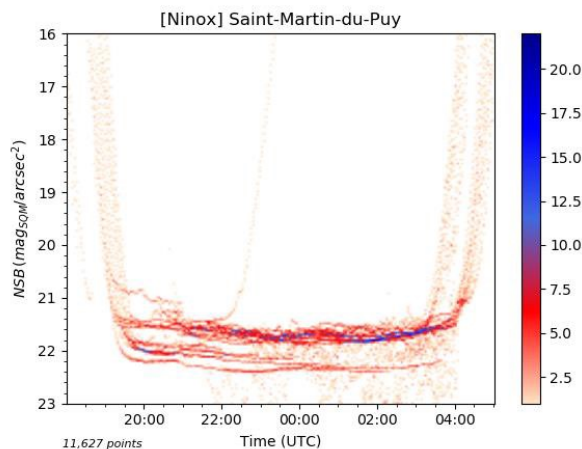
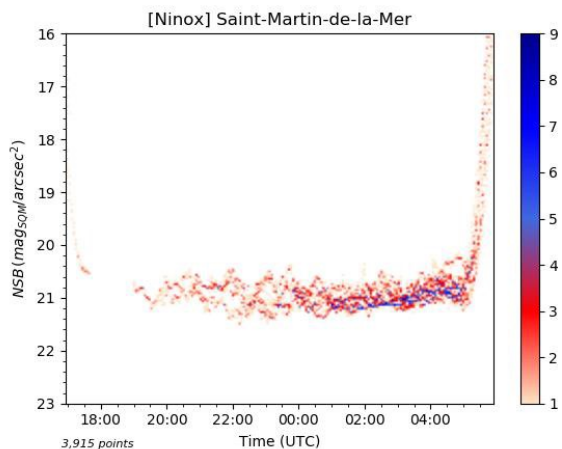
Le site de Liernais est impacté par des sources de pollution lumineuse relativement proche (la ville de Liernais à moins de 2km) et l'on peut constater que l'on n'a pas d'inversion de l'étendue de NSB. Cette dernière est tout de même contenue ce qui fait que l'on atteint en cœur de nuit des valeurs de meilleur NSB correctes de l'ordre de 21,5 mag/arcsec².



Avec un mois de mesures et quelques belles nuits claires, le site de Luzy est bien caractérisé. On peut voir à l'étendue de NSB positive que l'éclairage de la commune à proximité induit un certain niveau de pollution lumineuse dans des conditions nuageuses spécifiques.

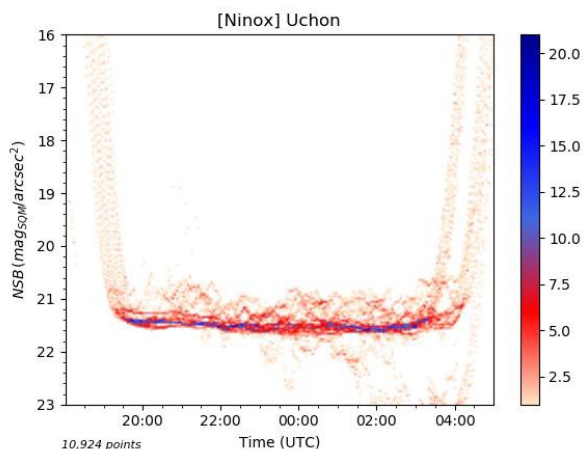


On manque de données sur les site de Saint-Agnan et il est très difficile de réaliser une caractérisation minimale. Le site semble sombre du fait de l'inversion de l'étendue de NSB.



Il y a eu aussi peu de nuits claires sans Lune sur le site de Saint-Martin-de-la-Mer. Une estimation grossière du NSB en cœur de nuit a pu être réalisée mais il aurait fallu compléter la caractérisation du site au travers de plus de mesures.

Durant certaines nuits, le capteur du Ninox a été assombri accidentellement ce qui explique les niveaux très bas sur le diagramme. On dispose cependant de suffisamment de nuits claires pour évaluer le NSB en cœur de nuit (zone de densité en bleu sur le diagramme).



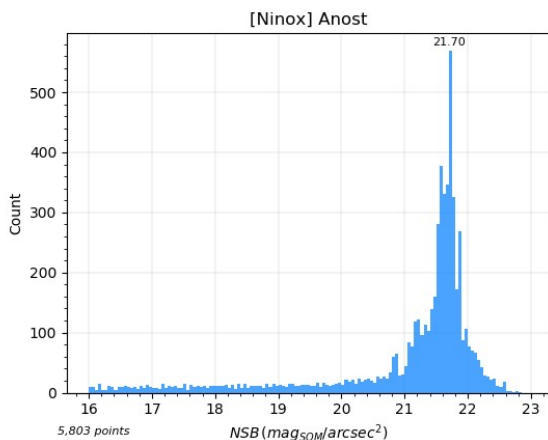
Le site d'Uchon est bien caractérisé. Il possède un ciel typiquement de qualité intermédiaire avec un inversion de NSB dans certaines conditions nuageuses et au contraire un ciel plus lumineux dans d'autres conditions (nuages plus élevés) pour lesquelles il est impacté par la pollution lumineuse du Creusot.

4.5.2 Histogrammes de magnitude

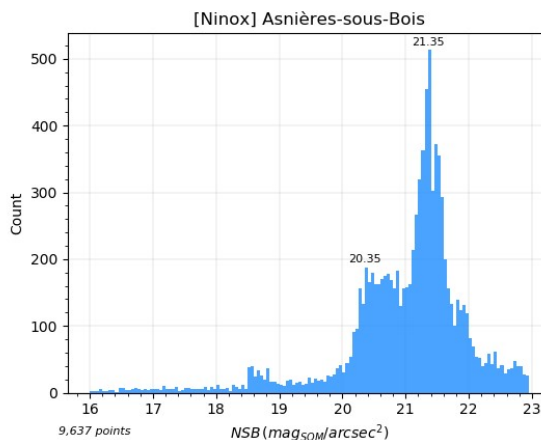
Les histogrammes de magnitude permettent de visualiser facilement les valeurs de NSB correspondant à différentes conditions atmosphériques. Sur ces diagrammes, on trace des barres verticales qui témoignent de la fréquence d'apparition des différentes valeurs de NSB sur l'axe horizontal.

Les histogrammes de magnitude des 17 sites de mesure Ninox sont fournis ci-dessous (l'échelle de NSB horizontale est la même pour tous les histogrammes afin de pouvoir réaliser des comparaisons). La plupart des histogrammes font apparaître un pic élevé sur la droite du diagramme. Ce pic définit en quelque sorte le NSB de référence du site par conditions moyennes de ciel clair. Il ne s'agit pas du meilleur NSB obtenu sur le site (qui se situe plus sur la droite), mais plutôt d'un NSB nominal moyen qui apparaît de manière fréquente par ciel clair. Plus le pic de ciel clair est à droite, meilleure est la qualité du site.

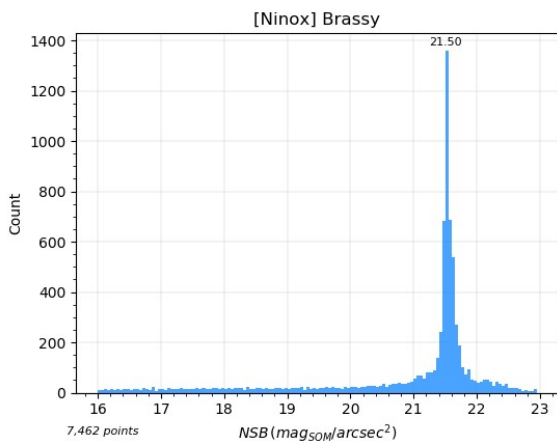
Les sites peu pollués n’ont qu’un pic dans leur histogramme (pic de ciel clair) alors que les sites plus pollués font apparaître des pics sur la gauche du pic de ciel clair qui correspondent aux conditions de ciel couvert les plus fréquentes. Plus la partie gauche des histogrammes est peuplée (forte luminance par conditions de ciel couvert), plus la pollution lumineuse relevée sur le site est importante. Si certains sites possèdent un ou plusieurs pics en partie droite, cela peut signifier que l’étendue de NSB est inversée et que le pic de ciel couvert est placé plus à droite (zone plus sombre) que le pic de ciel clair. Cela est typique des sites de qualité qui s’assombrissent en présence de nuages, ce qui est le cas pour de nombreux sites de mesures sur l’emprise du PNR du Morvan. Cela est typique des sites de qualité qui s’assombrissent en présence de nuages.



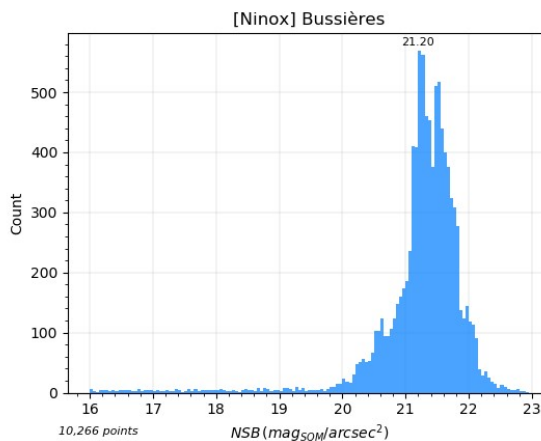
Le NSB nominal de Anost est bien défini et sa valeur montre que le site est très sombre.



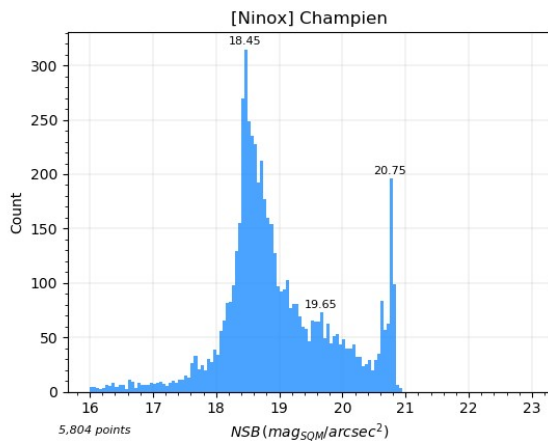
Le pic de ciel clair d’Asnières-sous-Bois est à un niveau de NSB nominal relativement modeste et l’on voit un pic rapproché à gauche qui correspond aux conditions de ciel couvert les plus courantes sur la période de mesures.



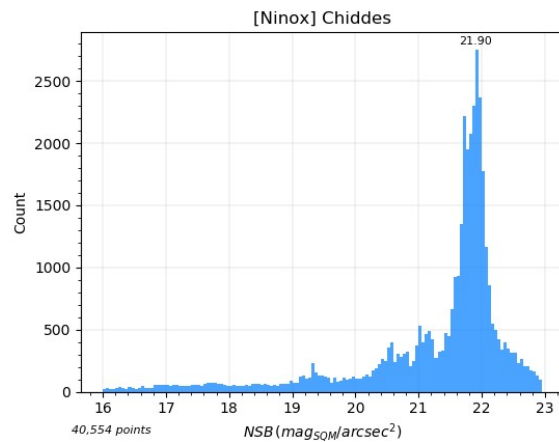
Le pic de ciel clair de Brassy est parfaitement défini avec une très forte émergence. Il montre que le site est de très bonne qualité.



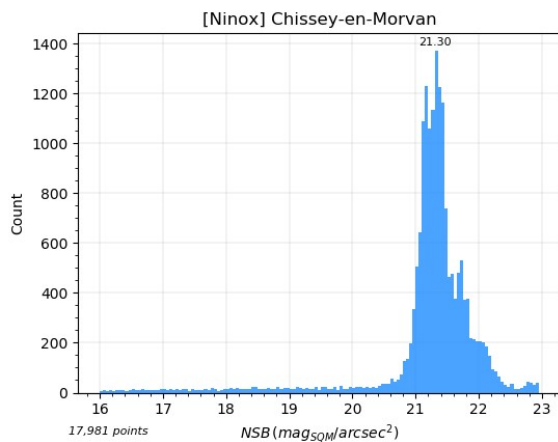
Le site de Bussièrès présente des conditions de ciel clair assez variées sur la période de mesure mais on relève des conditions de NSB qui témoignent d’une qualité de ciel correcte.



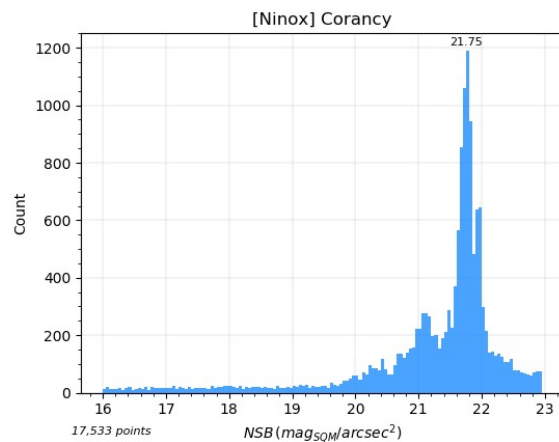
Il y a eu peu de nuits claires sur le site de Champien mais le pic de ciel clair apparaît tout de même à droite tout en étant assez peu marqué. Le pic de ciel couvert est massif sur la gauche et témoigne d'une forte pollution lumineuse.



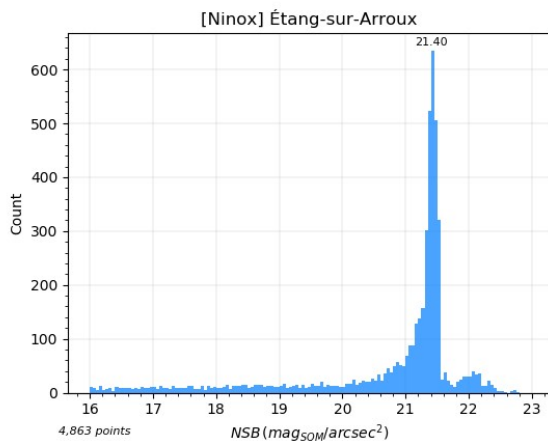
Le site de Chiddes a un pic de ciel clair bien marqué avec un très bon NSB nominal. La traîne sur la droite de ce pic correspond aux conditions de ciel couvert avec une inversion de l'étendue de NSB (donc avec un ciel plus sombre).



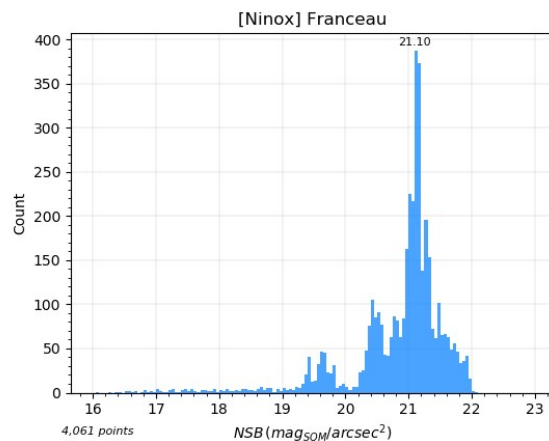
L'histogramme de magnitude de Chissey-en-Morvan est difficile à interpréter étant donné le problème de mesure rencontré sur ce site. Le NSB nominal par ciel clair est en fait le petit pic sur la droite du pic le plus important (voir le commentaire sur l'histogramme de densité de ce site).



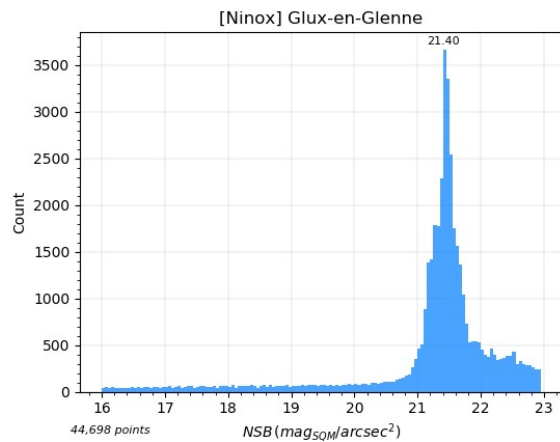
Le pic de ciel clair de Corancy est net et placé très à droite ce qui témoigne d'une très bonne qualité de ciel en cœur de nuit.



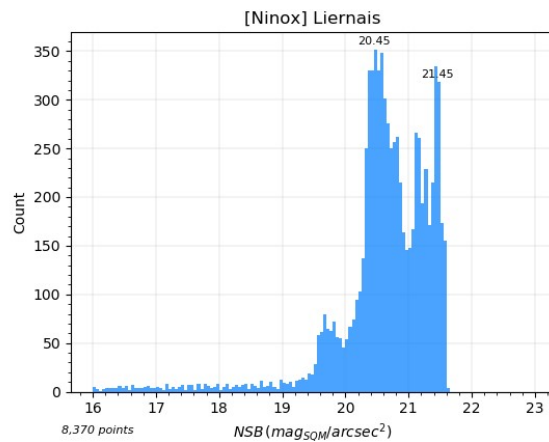
Le pic de ciel clair d'Étang-sur-Arroux est bien marqué et dénote une qualité très correcte avec un NSB nominal à 21,40 $\text{mag}/\text{arcsec}^2$.



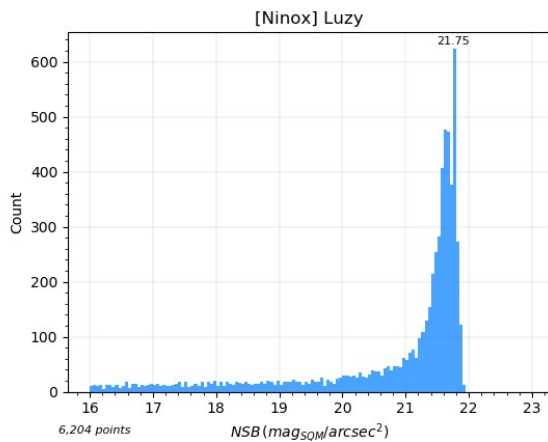
Le Pic de ciel clair de Franceau est bien marqué mais à un NSB nominal relativement bas ce qui témoigne de la présence de sources de pollution lumineuse à moyenne distance.



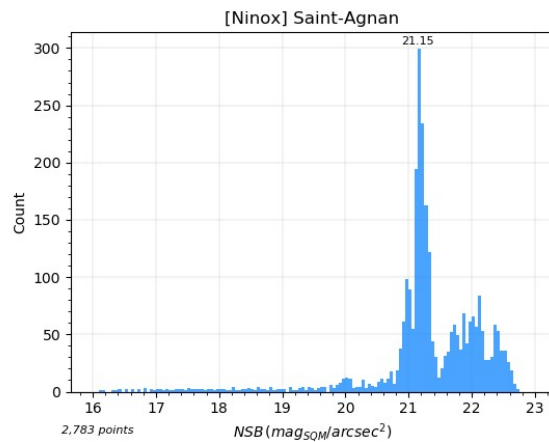
Le site de Glux-en-Glenne est de qualité avec toutefois la base du pic de ciel clair assez large qui témoigne de conditions assez variées en présence de nuages. La traîne importante sur la droite indique qu'il existe des conditions de ciel couvert qui assombrissent fortement le site.



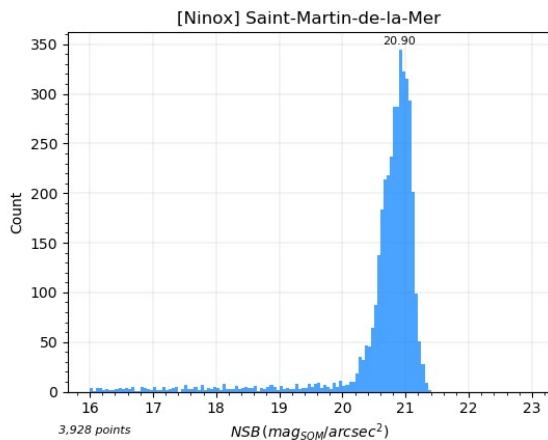
Le pic de ciel couvert très rapproché et très marqué sur la gauche du pic de ciel clair indique la présence de sources de pollution lumineuse à relativement courte distance.



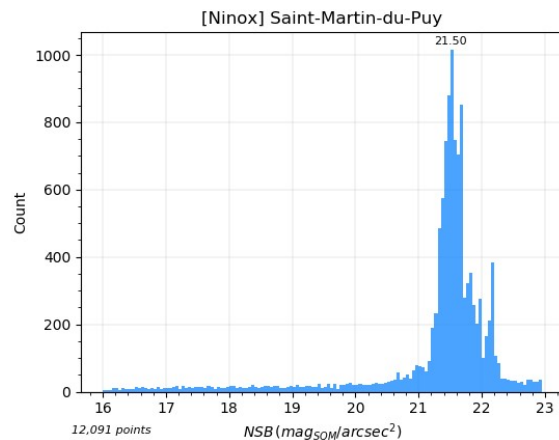
Le site de Luzy possède un très bon NSB nominal, mais dans certaines conditions nuageuses la luminance du ciel s'accroît ce qui témoigne de la présence de sources lumineuses assez proches.



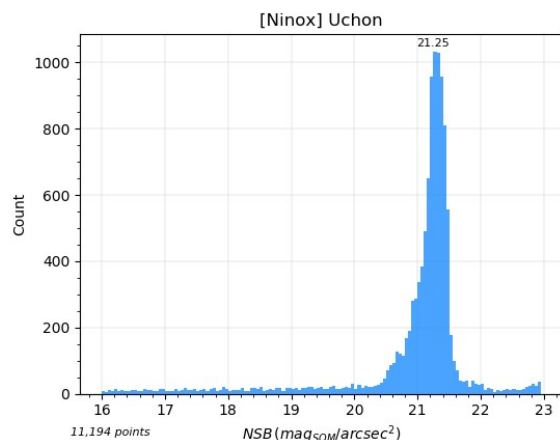
Malgré la position relativement modeste du pic de ciel clair en termes de NSB nominal, on remarque une inversion de l'étendue de NSB significative. Plus de mesures seraient nécessaires pour mieux caractériser le site.



Il y a eu peu voire pas de nuits claires lors des mesures sans Lune sur le site de Saint-Martin-de-la-Mer. Il est donc difficile de bien juger de la qualité du site sur la base de ce jeu de mesures.



Un assombrissement accidentel du capteur rend l'interprétation difficile pour le site de Saint-Martin-du-Puy. Le NSB nominal semble toutefois correct.

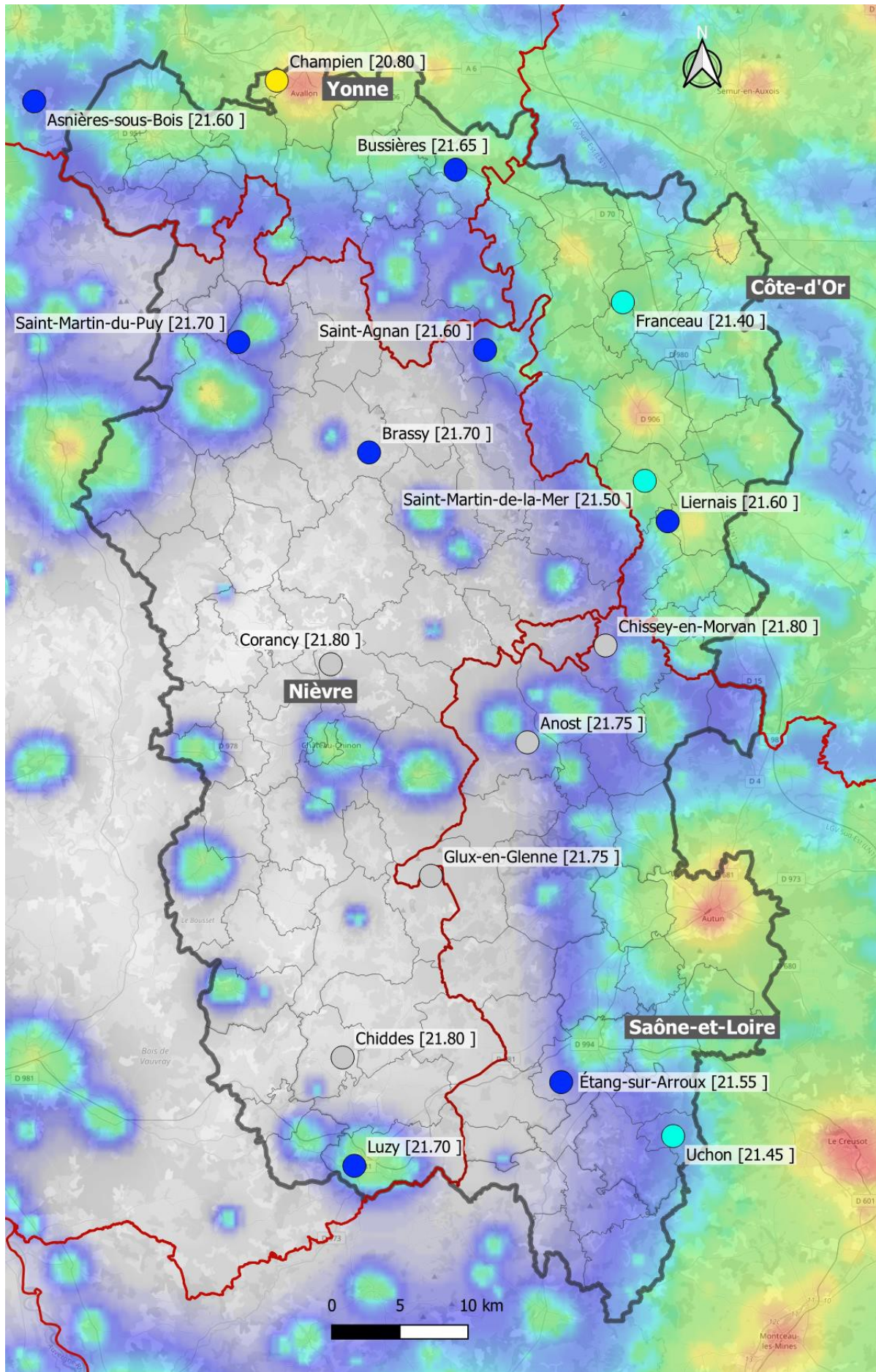


Le site de Uchon est de qualité intermédiaire avec un renforcement de l'histogramme sur la gauche du pic de ciel clair.

4.6 NSB en cœur de nuit

Le **NSB en cœur de nuit** caractérise un site dans des conditions moyennes de ciel clair après d'éventuelles extinctions. Comme cela a été indiqué plus haut dans ce rapport, le NSB (*Night Sky Brightness*) représente la mesure de la luminance du fond de ciel au zénith (exprimée en mag/arcsec²) et définit donc une échelle de pollution lumineuse (plus sa valeur est basse, plus le fond de ciel est brillant et plus la pollution lumineuse est importante).

La carte ci-dessous montre les NSB en cœur de nuit obtenus pour chacun des 17 sites de mesures sur la base d'une analyse des données reportées par les systèmes Ninox. Il s'agit donc des valeurs typiques de qualité de ciel que l'on peut constater après extinction et diminution de l'activité humaine en cœur de nuit par ciel clair et sans Lune. Le fond de carte est celui obtenu par simulation à partir des données de radiance satellite (jeu composite synthétique 2019) par des conditions moyennes de ciel clair et en cœur de nuit (i.e. après extinction des communes). La radiance liée à l'éclairage du barrage du lac de Pannecière a été enlevée dans cette simulation, et la carte représente donc la situation à la fin de l'année 2019. Cette carte de pollution lumineuse montre donc les NSB en cœur de nuit que l'on peut attendre en tout point du territoire, en absence de Lune et après extinction en cœur de nuit.



NSB en cœur de nuit obtenus pour les 17 sites de mesures Ninox

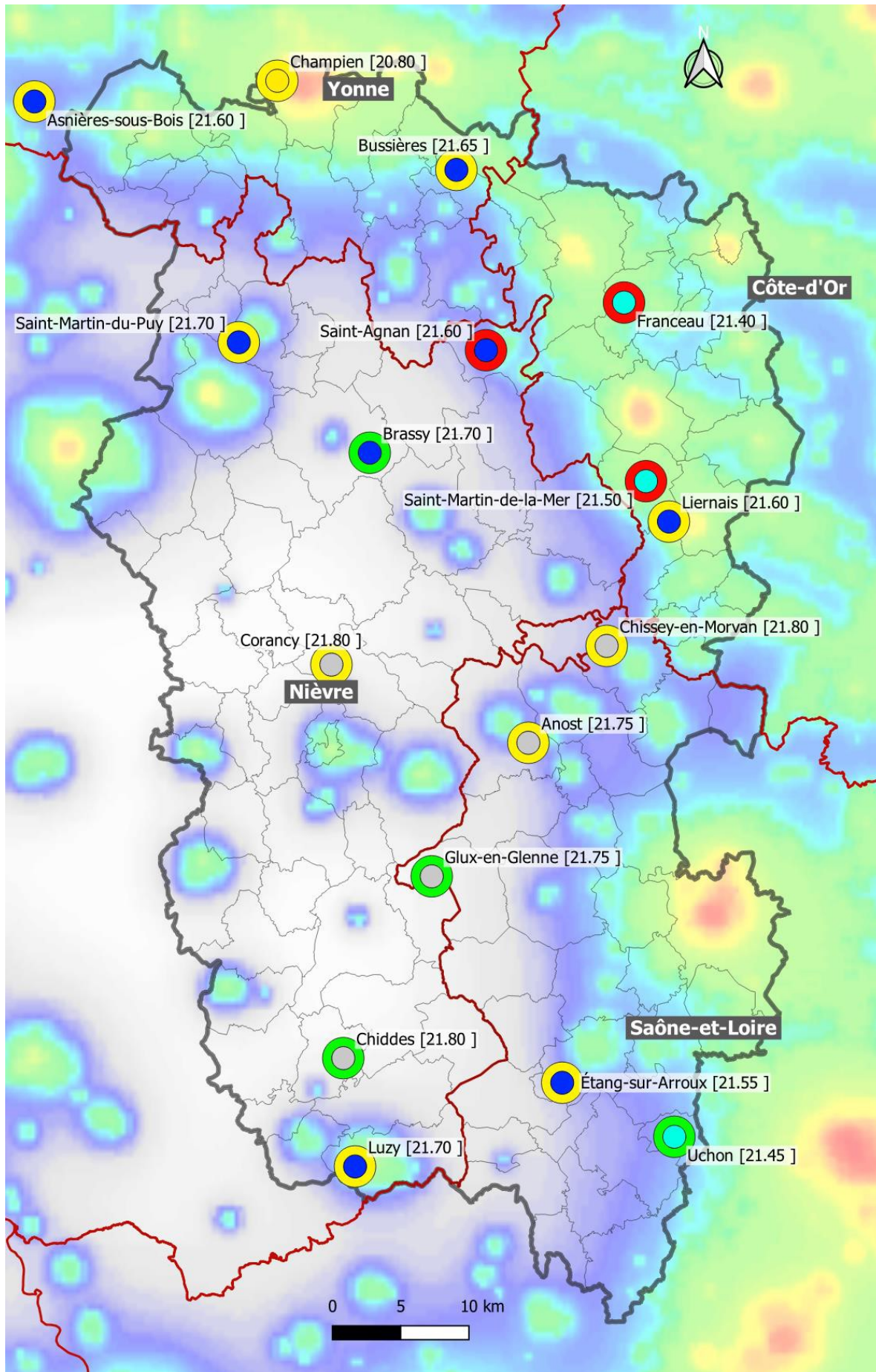
Les couleurs utilisées pour les NSB sur chacun des 17 sites de mesure Ninox sur la carte se rapportent à l'échelle montrée au début de cette section. On voit qu'il y a globalement une assez bonne cohérence entre le résultat de simulation et les mesures sauf pour quelques sites (sachant qu'il y a des effets de seuils pour les couleurs utilisées sur les points de relevés Ninox et que des éclairages locaux peuvent aussi jouer sur les NSB mesurés en cœur de nuit).

Pour certains sites, il se peut que la topographie des lieux atténue la pollution lumineuse à moyenne distance. Il est de façon générale plus pertinent de juger de la qualité d'un site en analysant les histogrammes fournis pour chacun des sites dans les deux sections précédentes de ce document.

Certains sites ne semblent pas être en accord avec les prédictions de la carte, et ce sont systématiquement ceux pour lesquels on ne dispose pas d'assez de données comme cela a été indiqué dans les commentaires attachés aux histogrammes de densité plus haut dans cette section. Afin de mieux visualiser les sites problématiques, un indice de confiance sur les mesures Ninox a été attribué à chaque site :

- **0** si très peu de mesures Ninox ont été réalisées, ne permettant pas de déterminer de manière fiable un NSB en cœur de nuit ;
- **1** si la campagne de mesure sur le site est imparfaite (par exemple pas suffisamment longue ou avec un problème technique), ne permettant que de faire une détermination approchée du NSB en cœur de nuit ;
- **2** si les mesures Ninox ont été réalisées sur une longue période et permettent de très bien caractériser le site avec une très bonne confiance sur la détermination du NSB en cœur de nuit.

La carte ci-dessous montre à nouveau les 17 sites de mesure avec les valeurs de NSB en cœur de nuit, mais avec cette-fois-ci une pastille colorée disposée autour du point représentant la mesure de chaque site. Cette pastille est **rouge** si l'indice de confiance est de 0, **jaune** s'il est de 1 et **vert** s'il est de 2. Cette approche permet de visualiser rapidement la confiance que l'on peut avoir de la détermination du NSB de cœur de nuit et ainsi réaliser une comparaison plus pertinente avec le résultat de la simulation de pollution lumineuse.



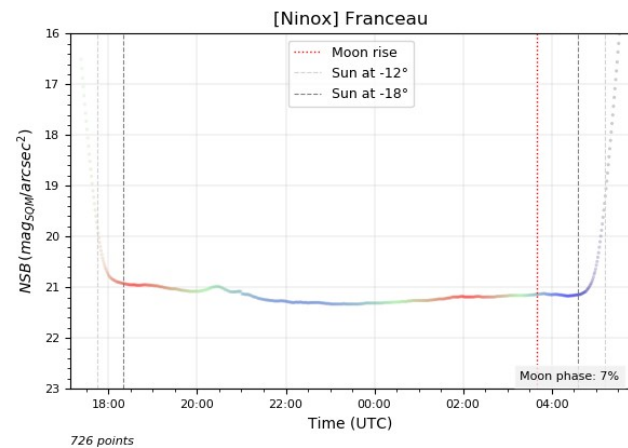
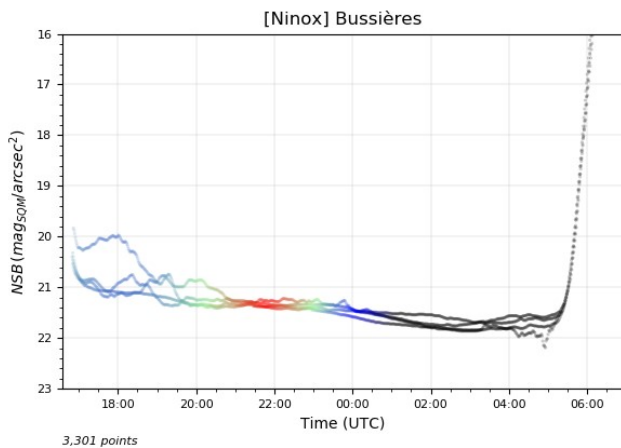
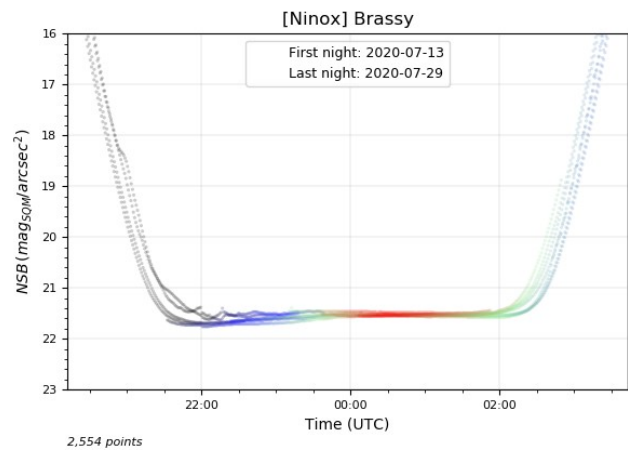
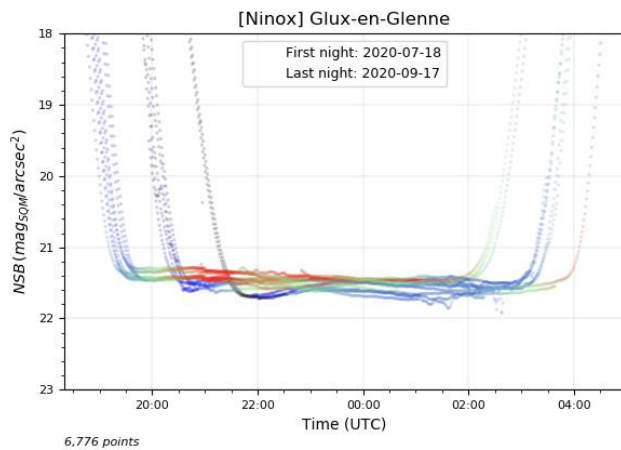
NSB en cœur de nuit pour les 17 sites de mesures Ninox avec en fond leur indice de confiance (rouge=confiance faible, jaune=confiance moyenne, vert=confiance élevée)

4.7 Meilleures nuits sur certains sites

Un phénomène intéressant est observé parmi quelques-uns des sites de l'étude pour lesquels la période de mesure Ninox a été favorable en termes de nuits claires de qualité sans Lune. Durant ces nuits claires, la luminosité du fond de ciel au zénith a tendance à varier au cours de la nuit du fait du passage de la Voie lactée au zénith.

Les graphiques ci-dessous montrent les meilleures nuits obtenues pour 4 des 17 sites de mesure Ninox sur l’empreinte du Parc naturel régional du Morvan. Les courbes sont tracées en codant la couleur en fonction de la valeur absolue de la latitude galactique du zénith selon le dégradé rouge (0° de latitude galactique), vert (10° de latitude galactique), bleu (20° de latitude galactique) et noir (30° de latitude galactique et au-delà). Lorsque la latitude galactique du zénith est proche de zéro, cela signifie que la Voie lactée est bien présente au zénith et que l’on peut s’attendre à une luminance accrue mesurée par les systèmes Ninox (zones rouges dans les courbes). Lorsque la latitude galactique du zénith est élevée en valeur absolue, cela signifie que la Voie lactée n’est pas du tout présente au zénith et que l’on peut s’attendre à une luminance moins élevée mesurée par les systèmes Ninox (zones noires dans les courbes).

Les nuits ont été filtrées automatiquement au travers d’une heuristique pour ne garder que celles qui comportent les profils de NSB les plus lisses, ce qui explique quelques imperfections dans les tracés. De plus, quand seulement une partie de la nuit a été claire, la nuit entière a été gardée dans les diagrammes, ce qui explique des profils nuageux agités en particulier en début de nuit.



Le phénomène est parfaitement visible sur les courbes de Glux-en-Glenne et de Brassy avec une corrélation directe entre le niveau de NSB et la couleur de la courbe. La lecture du diagramme de Bussières est rendue un peu plus difficile par le fait que l'on a systématiquement une pente des courbes de NSB de ciel clair en début de nuit du fait de la diminution de l'activité humaine dans les agglomérations proches des sites de mesure (extinction des communes, trafic routier, éclairage privé, etc.). On arrive malgré tout facilement à identifier l'abaissement de brillance du ciel au fur et à mesure que la Voie lactée sort du champ de mesure des systèmes Ninox (champ caractérisé par un angle solide de 20° autour du zénith). Comme la Voie lactée était présente au zénith en début de nuit, la sortie de la Voie lactée du champ de mesure a accompagné la diminution de l'activité humaine et a accéléré l'assombrissement du ciel au zénith et donc augmenté la pente de descente. Sur le site de Franceau, on peut voir que la Voie lactée est présente en début de nuit au zénith et qu'elle revient ensuite, provoquant une remontée du niveau de NSB sur le graphique.

On peut donc constater que même sur des sites relativement impactés par la pollution lumineuse, il est possible de mesurer l'influence de la Voie lactée lors des nuits claires et de bonne qualité.

5 Simulation de la pollution lumineuse

La réalisation de simulations de la pollution lumineuse sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan est nécessaire à plusieurs titres :

- La simulation permet, pour des conditions spécifiques de conditions atmosphériques, d'estimer la qualité de ciel en tout point du territoire et d'identifier les zones à enjeu ;
- Elle permet aussi de bien différencier les situations en extrémités de nuit (sans extinction) et en cœur de nuit (après extinction) ;
- Elle permettra également de définir les contours possibles de la zone cœur pour le projet de RICE.

Dans le cadre de ce projet pour le territoire du Parc naturel régional du Morvan, il a été décidé de réaliser deux simulations :

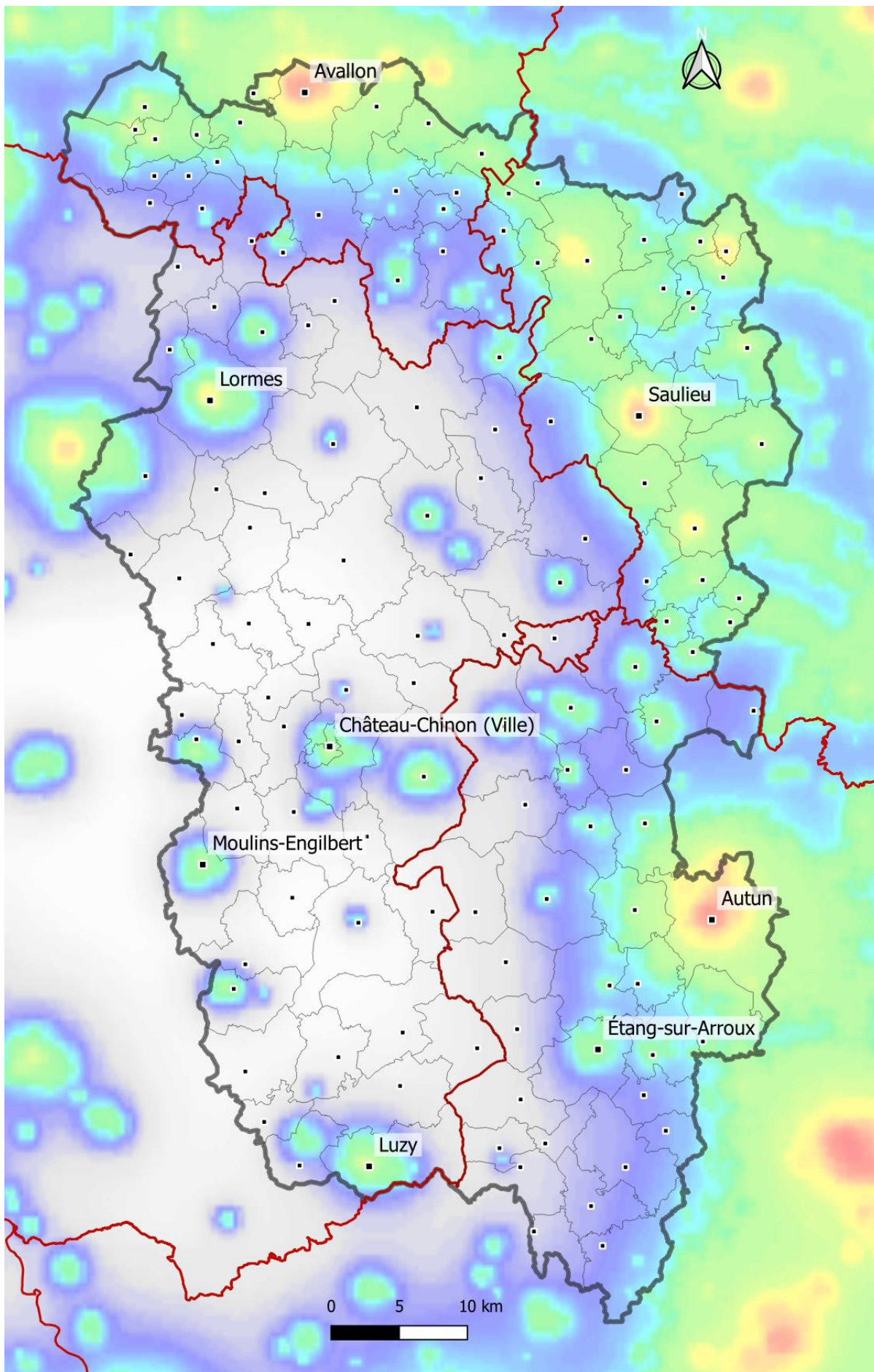
1. La première simulation a pour objectif de représenter la situation en cœur de nuit après extinction des communes qui ont adopté cette pratique. Cette simulation est réalisée en utilisant des données de radiance satellite VIIRS-DNB d'un jeu synthétique assemblé à partir de radiances satellites mensuelles³ de l'année 2019. Ce processus de création d'un jeu synthétique à partir de données de radiances mensuelles a été développé par DarkSkyLab sachant, qu'à ce jour, le NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) ne fournit pas de jeux composites annuel en dehors des années 2015 et 2016. On fait l'hypothèse que les heures de passage satellite sont telles que les radiances obtenues sont représentatives des conditions d'extinction en cœur de nuit ;
2. La seconde simulation a pour objectif de représenter la situation en extrémités de nuit sans extinction des communes qui ont adopté cette pratique. Cette simulation est réalisée en utilisant plusieurs sources de données : (a) en dehors des limites du PNR, on utilise les données de radiance satellite VIIRS-DNB du jeu composite synthétique 2019 (b) à l'intérieur des limites du PNR, on utilise les données de points lumineux fournies par les syndicats d'énergie lorsqu'elles sont disponibles, c'est-à-dire pour toutes les communes de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne qui se trouvent dans le périmètre du Parc sauf pour 4 communes

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

(c) à l'intérieur des limites du Parc, lorsque les données de points lumineux ne sont pas disponibles et que les communes ne pratiquent pas l'extinction, on conserve les radiances satellite associées aux communes correspondantes. C'est le cas pour les deux villes d'Autun et d'Avallon en bordure de Parc – les points lumineux ne sont pas connus pour ces 2 communes mais elles ne pratiquent a priori pas d'extinctions significatives (d) à l'intérieur du Parc, 2 communes pratiquent l'extinction et on ne possède pas leurs points lumineux (Foissy-lès-Vézelay et Bussières). Pour ces communes, on injecte dans la simulation des sources de radiance à l'aide d'une heuristique basée sur les populations. De plus, à l'extérieur du Parc, comme de très nombreuses communes pratiquent l'extinction, on identifie ces communes dans une large zone tampon autour du PNR et on utilise la même heuristique basée sur les populations pour évaluer leur contribution en extrémités de nuit. Cette dernière option (utilisation des populations pour estimer les radiances) est bien sûr moins précise que d'utiliser les radiances satellites et les points lumineux, mais elle permet malgré tout d'estimer la contribution de communes dont on ne connaît pas les points lumineux et qui pratiquent l'extinction (et qui n'ont donc pas de radiance satellite associée).

5.1 Simulation en cœur de nuit

La carte ci-dessous montre le résultat de la simulation en cœur de nuit réalisée uniquement à partir des données de radiance satellite VIIRS-DNB du composite synthétique 2019, ceci dans des conditions moyennes de ciel clair. Les centres-bourgs (et non pas les centres des communes puisque plusieurs bourgs peuvent être regroupés pour former une seule commune) sont indiqués par des carrés noirs et ils permettent de voir les agglomérations avec peu d'émissions de lumière ou bien où des extinctions notables sont constatées. L'échelle de couleur utilisée dans cette carte est la même que celle présentée dans la section 4.2 de ce document. Les limites du Parc naturel régional du Morvan sont représentées (trait fort en noir) ainsi que les limites des départements (trait rouge) et les limites des communes (traits en gris clair). Le fond de carte *OpenStreetMap* a été supprimé pour mieux appréhender les différents niveaux de luminance zénithale sur le territoire. Dans la simulation, la radiance associée au barrage du lac de Pannecièrre a été supprimée puisque a priori les sources lumineuses sur ce site ne sont plus en service.



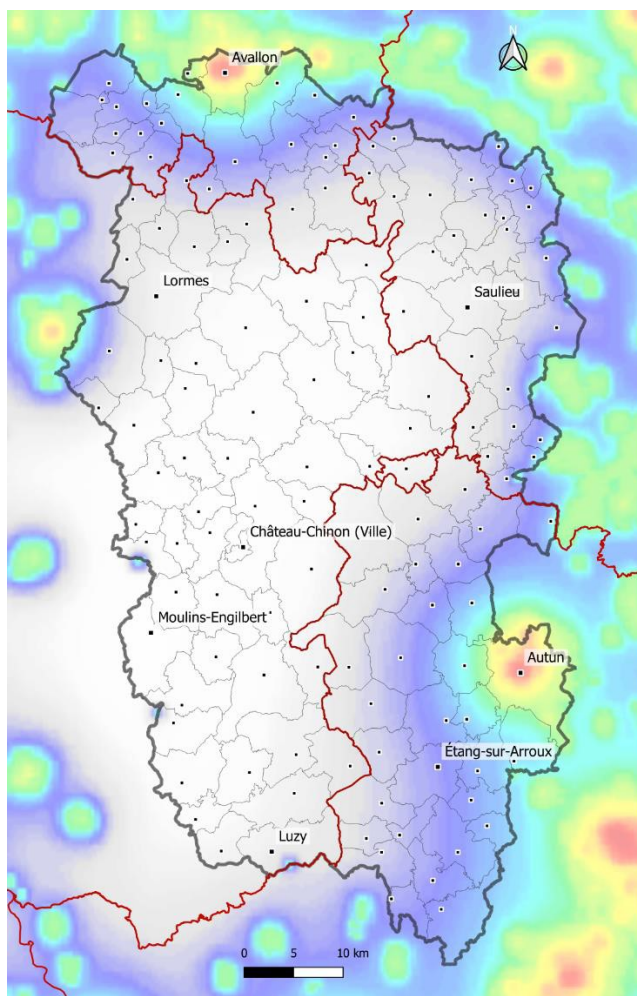
Simulation de la pollution lumineuse en cœur de nuit

On peut constater qu'en cœur de nuit la situation est excellente sur la plus grande partie du Parc naturel régional avec un ciel très sombre au zénith. De larges zones sont complètement indemnes de sources de lumière, que ce soit d'origine publique ou privée. Il n'y a pas d'effet de mitage dû à la présence de petites communes dont l'éclairage public resterait allumé en cœur de nuit. La situation est particulièrement bonne pour les communes sur le département de la Nièvre. La frange Est de la partie du PNR située en Saône-et-Loire est un peu plus impactée par les quelques communes qui n'éteignent pas et par la proximité de la ville d'Autun. La frange Nord de la partie du PNR située dans l'Yonne ne tire pas elle non plus bénéfice de l'extinction puisque peu de communes la pratiquent. La partie du PNR située en Côte-d'Or est clairement la plus impactée par la pollution lumineuse avec un peu moins d'extinctions et une forte présence d'éclairage privé.

Toutes les cartes de pollution lumineuses montrées dans ce rapport sont disponibles sous forme de rasters GeoTIFF. Elles permettent de connaître en chaque point du territoire la valeur estimée du NSB pour les conditions de simulation correspondantes.

5.2 Simulation en extrémité de nuit

Comme indiqué au début de cette section, la simulation de la pollution lumineuse en extrémités de nuit, et donc sans extinctions, utilise plusieurs sources de données : des données de radiance satellite, des données de points lumineux et des données de population. On parle alors de **simulation en mode mixte**.



Simulation après suppression de toutes les radiances du PNR

La première chose à faire pour réaliser une simulation mixte sur le Parc naturel régional du Morvan est de supprimer toutes les sources de radiance à l'intérieur du Parc. En effet, ces radiances satellites seront remplacées par des données de points lumineux ou bien par des radiances estimées à partir des populations si les données de points lumineux ne sont pas disponibles.

A titre informatif, la carte ci-contre montre le résultat d'une simulation où l'on a supprimé toutes les radiances à l'intérieur du Parc. Elle correspond donc à une situation hypothétique où l'on aurait pratiqué une extinction totale (éclairage public et privé) de toutes les communes du Parc (situation très irréaliste bien sûr...).

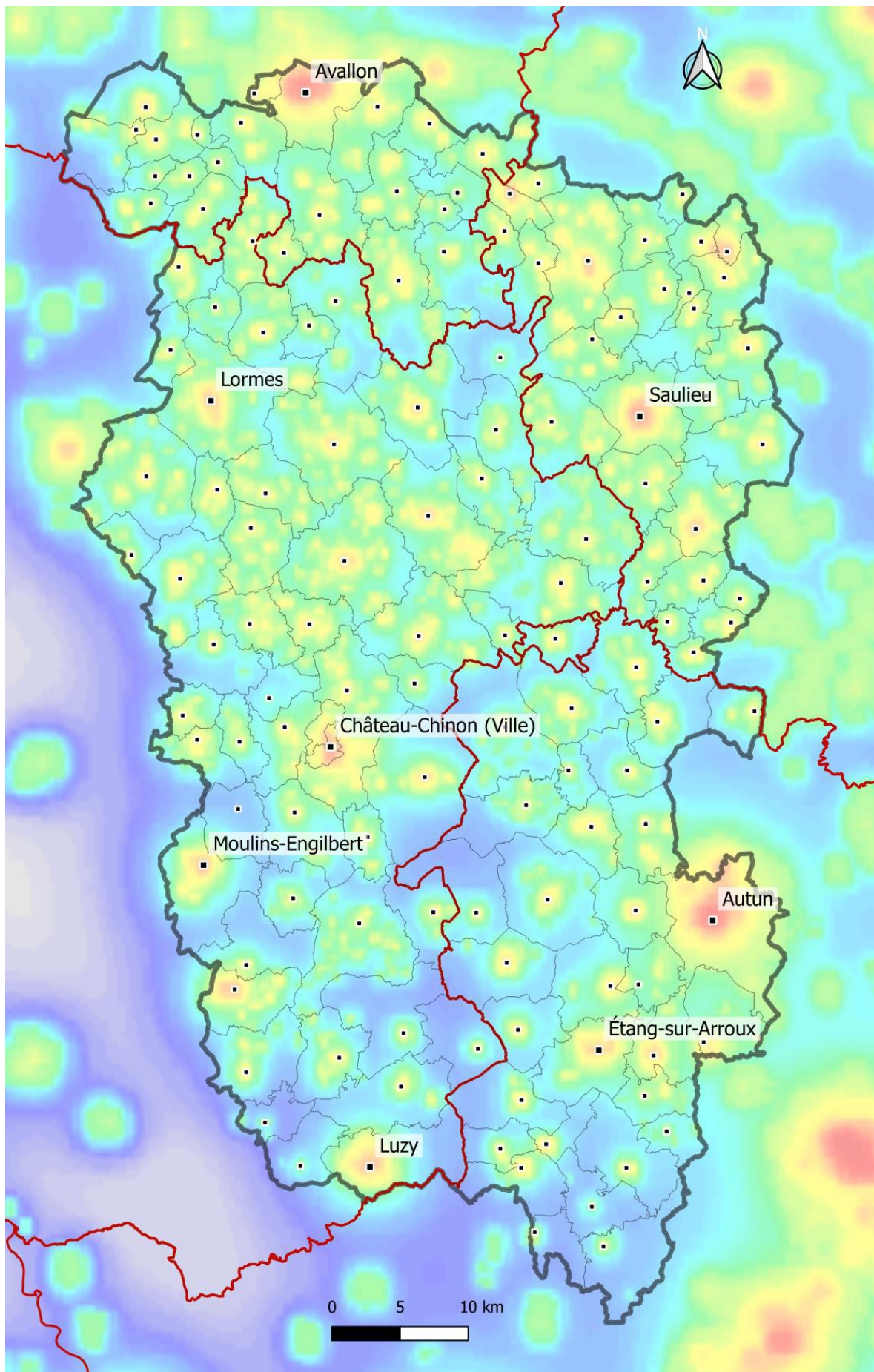
On remarquera que l'on n'a pas supprimé les radiances des villes d'Avallon et d'Autun puisque dans la simulation en mode mixte on ne dispose pas de leurs points lumineux et elles ne pratiquent a priori pas l'extinction. Cet état hypothétique permet de se rendre compte de l'impact de ces deux communes sur leur voisinage.

On peut constater que plusieurs zones de la bordure du Parc sont malgré tout impactées par les sources des communes présentes à proximité immédiate des limites du Parc (surtout dans la région d'Avallon au nord).

La simulation de la situation en extrémités de nuit se fait en réinjectant les données de points lumineux de 133 communes dans le modèle de simulation (qui correspondent à toutes les communes du PNR sur les départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne pour lesquelles on dispose des points lumineux). De plus, deux communes n'ont pas de données de points lumineux associées sur le département de l'Yonne. Afin de simuler au mieux la situation en extrémités de nuit, on procède donc comme suit :

- On supprime les radiances satellite sur l'empreinte du PNR sauf pour les communes d'Avallon et d'Autun ;
- On utilise les données de points lumineux pour les 133 communes du PNR sur les départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne ;
- On utilise les données de population pour les 2 communes de l'Yonne sur le PNR pour lesquelles on ne dispose pas des points lumineux : Bussières et Foissy-lès-Vézelay.

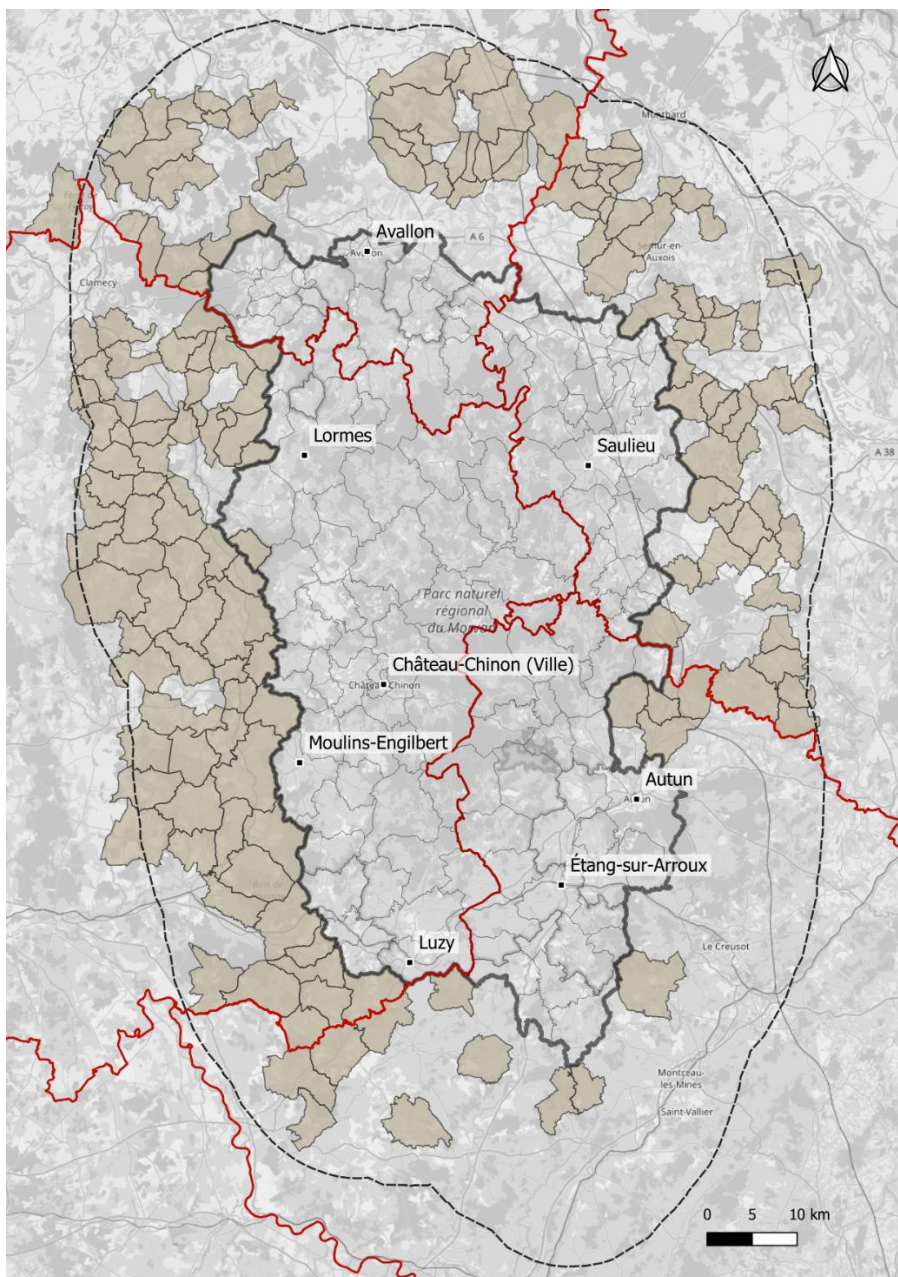
Sur cette base, la carte ci-dessous montre le résultat de la simulation mixte qui permet de représenter la situation en extrémités de nuit et en ne prenant en compte que les extinctions qui ont lieu dans le périmètre du Parc naturel régional du Morvan. Il est important de noter que la simulation mixte ne fait intervenir que les dispositifs d'éclairage public pour les 133 communes pour lesquelles on dispose de points lumineux dans le périmètre du Parc.



Simulation de la pollution lumineuse en extrémités de nuit en ne prenant en compte que les extinctions pour les communes dans l’empreinte du PNR du Morvan

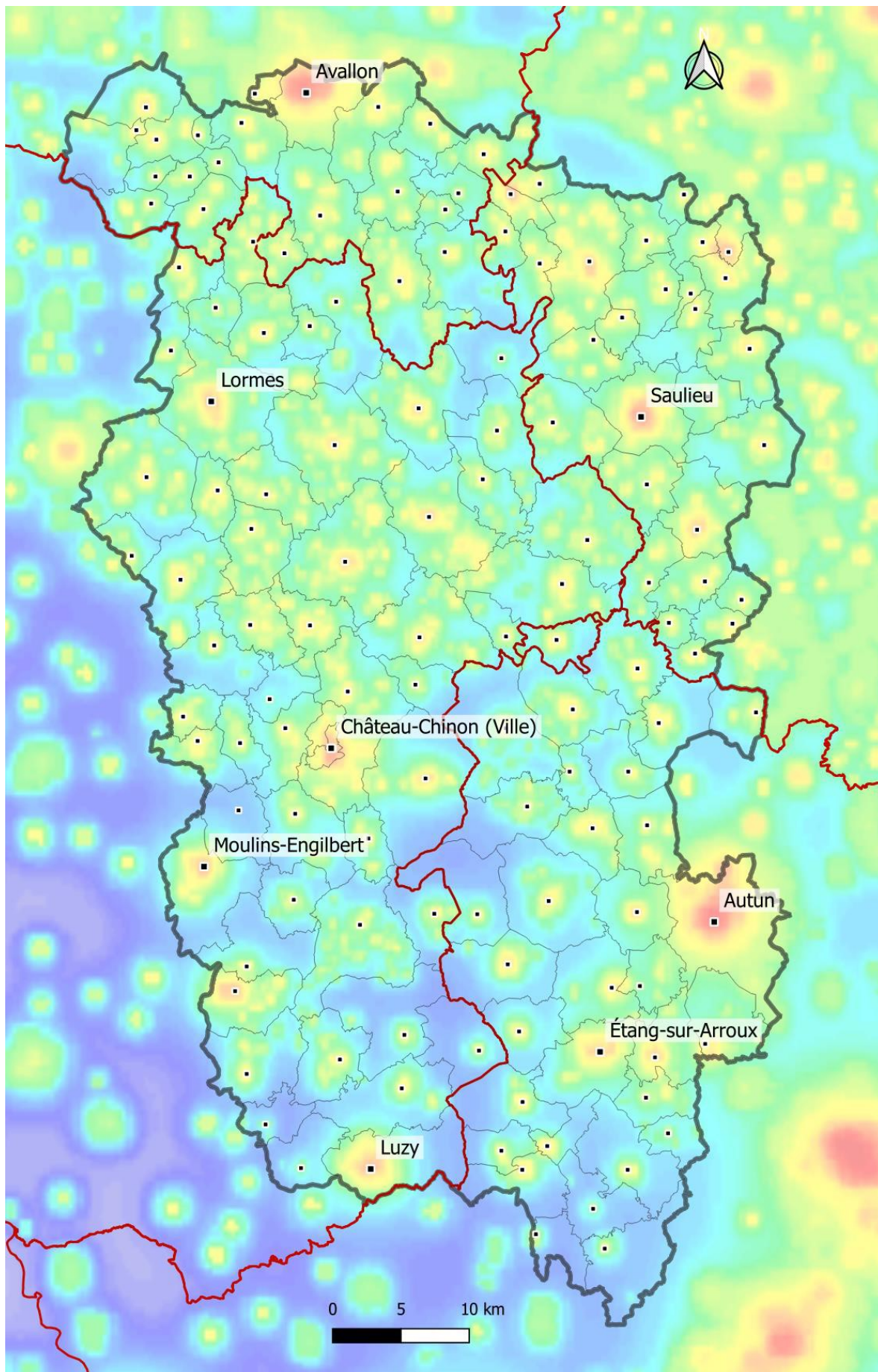
On constate que l'ensemble des bourgs possèdent maintenant des halos de pollution lumineuses (ou plus exactement que leur luminance zénithale est dégradée). Dans ces conditions de simulation en extrémités de nuit, le PNR du Morvan continue à avoir des zones sombres (en particulier à la limite des deux départements de la Nièvre et de la Saône-et-Loire), mais le paysage nocturne est toutefois radicalement différent. On peut constater un effet de « mitage » sur la zone qui était quasiment vierge de pollution lumineuse en cœur de nuit. En dehors des bourgs eux-mêmes, la présence de points lumineux dans de nombreux hameaux participe à cet effet de mitage sur le territoire du Parc.

La simulation en mode mixte pour la situation en extrémités de nuit est toutefois incomplète dans la mesure où de nombreuses communes à l'extérieur du Parc pratiquent l'extinction, ce qui peut aussi avoir une influence sur la pollution lumineuse en bordure de Parc. Pour pallier à ce problème, une seconde simulation en mode mixte a été réalisée. Elle est effectuée de la même façon que la première, mais on injecte dans la simulation les radiances des communes qui pratiquent l'extinction dans une large zone tampon autour du PNR lui-même. Cette injection de radiance dans la simulation se fait soit en utilisant les données de points lumineux si elles sont disponibles, soit en utilisant des données de population si les points lumineux ne sont pas disponibles (par exemple dans l'Yonne, la Nièvre et la Saône-et-Loire où les données de points lumineux ne sont pas disponibles à l'extérieur du PNR). La carte ci-contre montre la zone tampon et les communes qui n'ont pas de radiance associée autour des limites du PNR (fond beige).



Communes de la zone tampon sur laquelle les extinctions sont prises en compte pour la simulation en extrémités de nuit

Le résultat de cette seconde simulation en extrémités de nuit est fourni sur la carte ci-dessous :

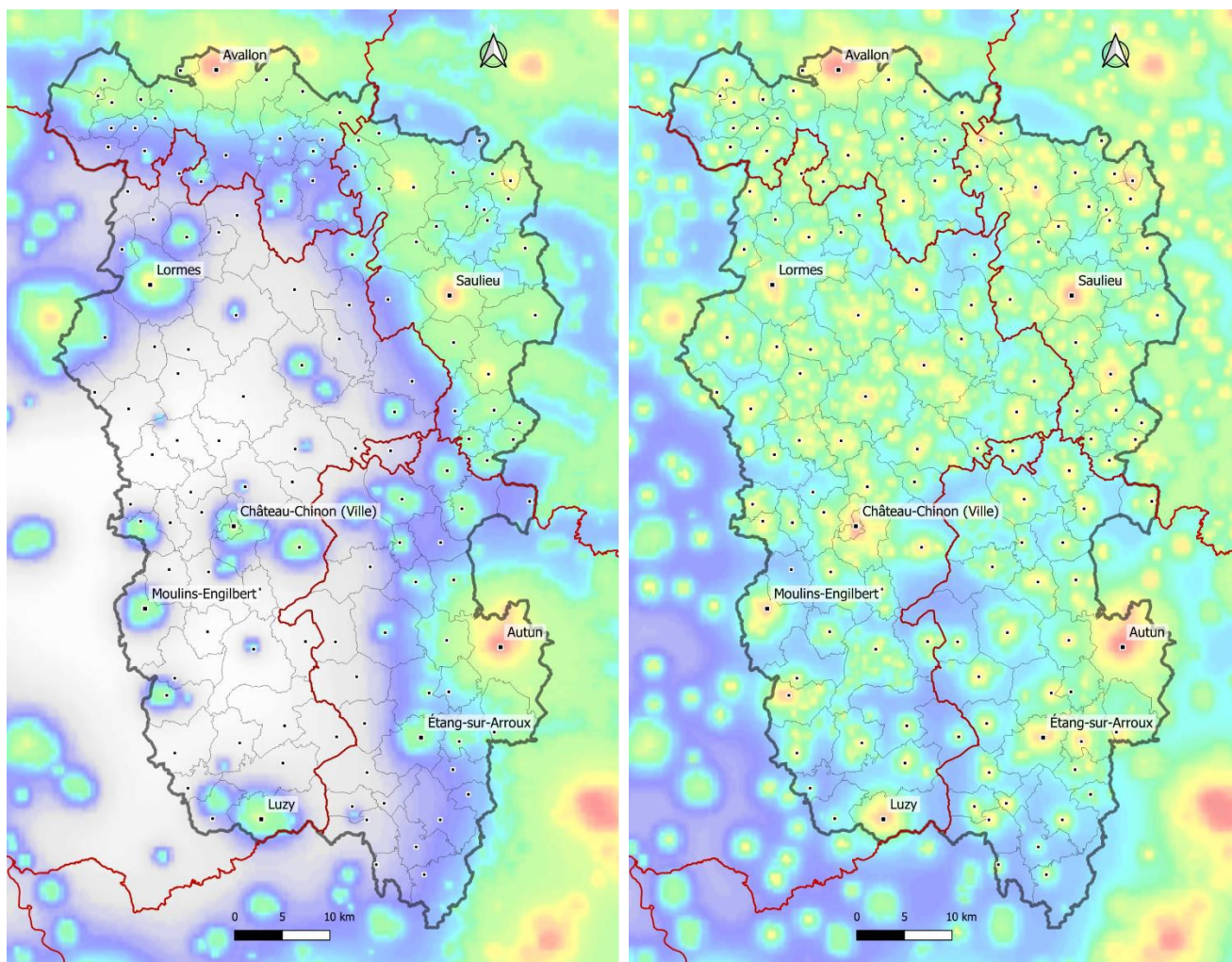


Simulation de la pollution lumineuse en extrémités de nuit en prenant en compte les extinctions pour les communes dans l’empreinte du PNR du Morvan et dans un périmètre autour du PNR

Les communes pratiquant l’extinction à l’extérieur du PNR étant de petite taille, leur influence en termes de pollution lumineuse sur le PNR lui-même est relativement modeste.

Il est important de noter que la simulation mixte ne fait intervenir que les dispositifs d’éclairage public dans le périmètre du PNR pour les zones où les points lumineux sont utilisés (donc dans la Côte-d’Or, la Nièvre et la Saône-et-Loire). Il faut donc voir cette simulation comme une contribution de l’éclairage public à la pollution lumineuse en extrémités de nuit sachant que des parcs d’éclairage privé peuvent contribuer de manière importante à la création des halos. Pour les communes sans extinction, une observation attentive de la carte, et une comparaison avec la situation en cœur de nuit, permet d’identifier des zones où les parcs d’éclairage privé contribuent de manière très significative à la pollution lumineuse. Il peut aussi y avoir des omissions dans les données de points lumineux fournies qui induisent une sous-estimation de la pollution lumineuse dans certaines zones.

Pour faciliter la comparaison, les deux cartes de simulation en cœur de nuit et en extrémités de nuit sont positionnées côte à côte ci-dessous :



Simulation en cœur de nuit

Simulation en extrémités de nuit

On peut constater que les deux situations sont radicalement différentes et qu’il est important de prendre en compte la situation en extrémités de nuit pour pouvoir juger de manière pertinente de l’impact de la pollution lumineuse sur les écosystèmes.

6 Activités complémentaires

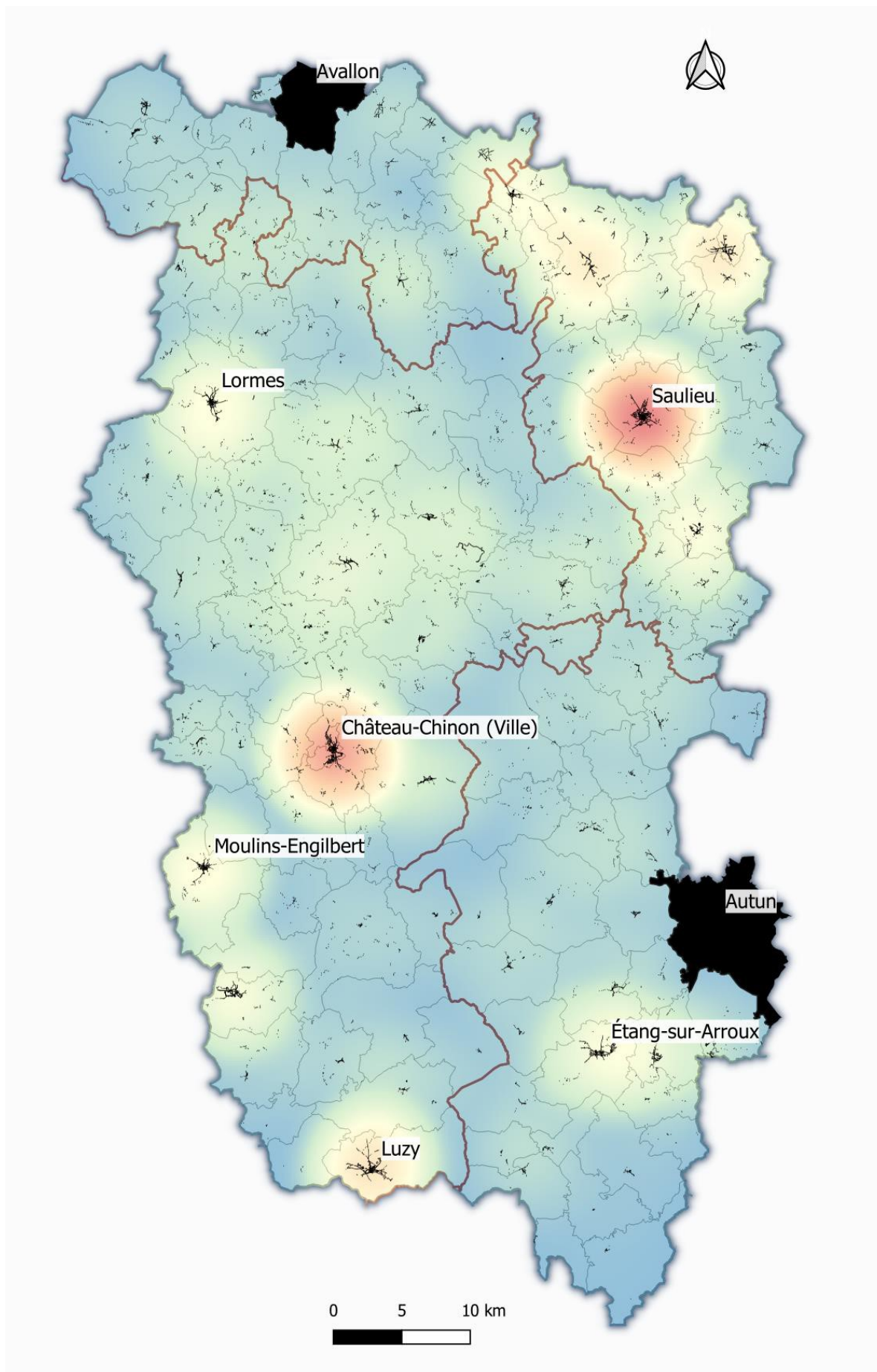
Dans le cadre du projet IPAMAC, le Parc naturel régional du Morvan a souhaité initier une réflexion sur la création d'une RICE (*Réserve Internationale de Ciel Etoilé*). Au-delà d'une qualité d'obscurité naturelle avérée et à préserver, un tel projet s'articule nécessairement d'un point de vue technique autour de la connaissance des parcs d'éclairage du territoire, spécialement en ce qui concerne la zone cœur de la RICE. A cet égard, nous présentons ici des éléments de réflexion concernant :

1. Des scénarios de tracé d'une zone cœur qui minimise le nombre de points lumineux qui y seraient intégrés. En effet l'IDA (*International Dark Sky Association*), l'organisme qui vérifie les conditions d'attribution du label et émet l'appellation de Réserve Internationale de Ciel Etoilé, impose des contraintes strictes concernant l'éclairage public et privé dans une zone cœur ;
2. Un inventaire technique des points lumineux dans une zone qui pourrait constituer une zone tampon de la RICE selon un format proche de celui requis par l'IDA dans le dossier de soumission. Les manques concernant cet inventaire seront identifiés.
3. La contribution de la ville d'Autun sur le site de Glux-en-Glenne situé à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de cette agglomération.

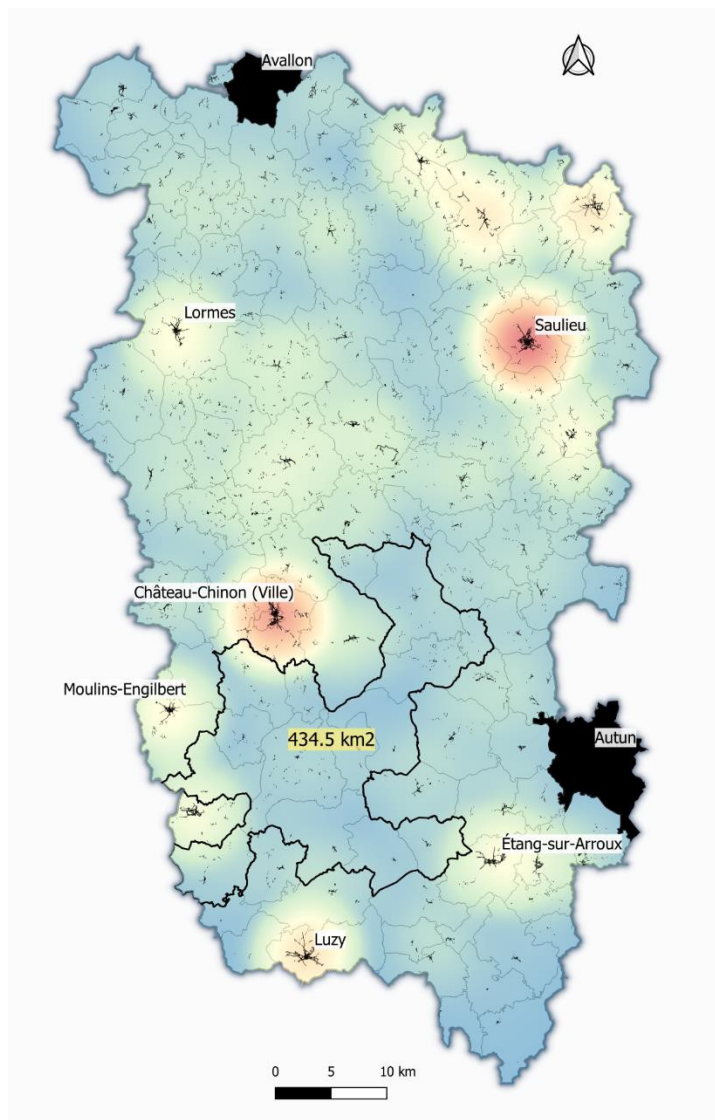
6.1 Positionnement d'une zone cœur de RICE

L'objectif étant de chercher à minimiser le nombre de points lumineux dans la zone cœur de RICE, il apparaît pertinent de déterminer dans un premier temps dans quelle partie du PNR du Morvan la densité de points lumineux est la plus faible. Pour cela, une « diffusion » des points lumineux géolocalisés qui ont été obtenus auprès des syndicats d'énergie dans le cadre de ce projet a été réalisée. La carte ci-dessous montre le résultat obtenu avec un échelle de couleur qui va du bleu (zones les moins denses en points lumineux d'éclairage public) au rouge (zones les plus denses en points lumineux) en passant par le vert clair et le jaune clair. Tous les points lumineux de l'éclairage public connus sont positionnés dans la carte sous forme de petits points noirs afin de ne pas gêner la visualisation de la carte de densité.

Remarque importante : On ne dispose pas des points lumineux des villes d'Autun et d'Avallon. Les densités associées à ces agglomérations ne sont donc pas représentées sur la carte et les territoires de ces deux communes ont été masqués. Les points lumineux pour les communes de Foissy-lès-Vézelay et Bussièrès (dans l'Yonne) sont aussi manquants, mais s'agissant de petites communes on ignore le fait que leurs contributions ne sont pas prises en compte.



Densité de points lumineux sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan sur une échelle de couleur allant du bleu (faible densité de points lumineux) au rouge (forte densité de points lumineux).



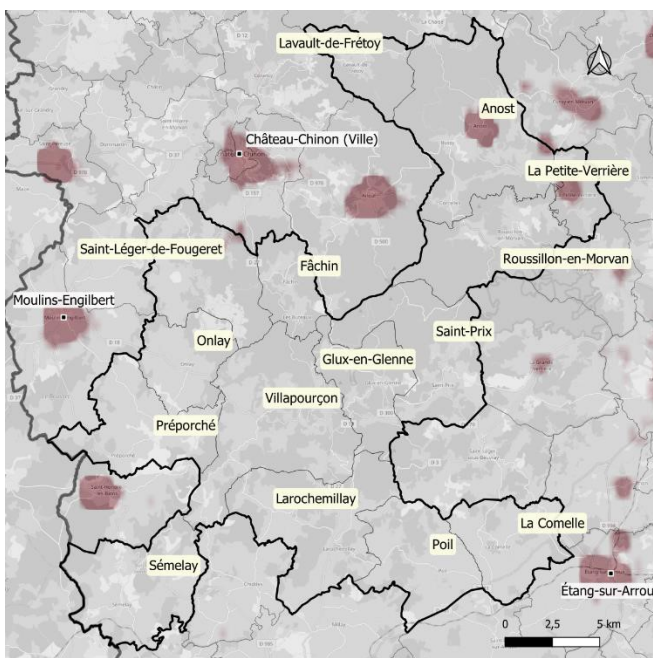
On constate sur la carte qu’il existe plusieurs zones ayant une faible densité de points lumineux. La plus importante se situe au sud de Château-Chinon, à cheval sur les départements de la Nièvre et de la Saône-et-Loire. Un autre est visible à l’extrême sud du PNR, mais l’analyse des radiances satellite montre qu’elle est un peu plus impactée par des sources d’éclairage privé.

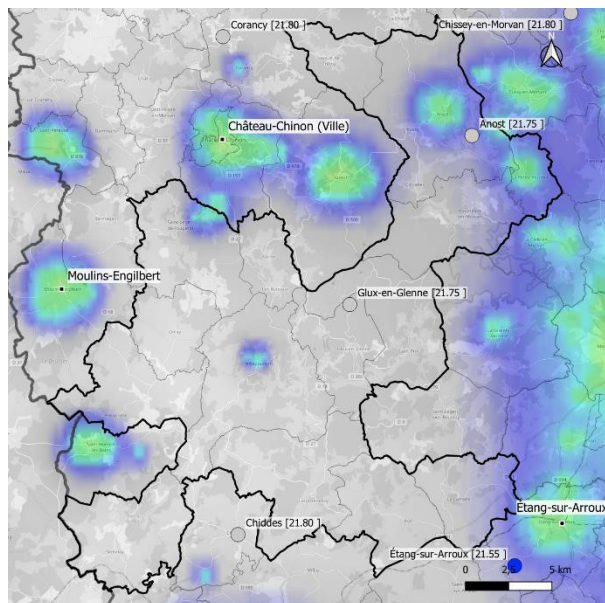
La carte ci-contre montre l’ensemble des 15 communes qui forme cette zone à faible densité de point lumineux. Elle fait plus de 400 km² et elle intègre 781 points lumineux, soit moins de 5% des 16 373 points lumineux connus du territoire si l’on ne compte pas les points lumineux des communes d’Autun et d’Avallon. Si l’on considère que le territoire possède environ 22 000 points lumineux en estimant ceux des 5 communes manquantes, la fraction de points lumineux de la zone considérée représente environ 3,6% du total.

On peut considérer qu’une gestion précise et une mise en conformité prioritaire de moins de 800 points lumineux dans le cadre de la création d’une zone cœur de RICE est une tâche envisageable.

La deuxième étape dans le processus de détermination d’un cœur de RICE consiste à évaluer la qualité de ciel à la fois en cœur de nuit après extinction de certaines communes (on sait que les communes pratiquant l’extinction sont très nombreuses sur le périmètre du Parc) et aussi en extrémités de nuit lorsque les extinctions ne sont pas pratiquées.

La carte ci-contre montre les niveaux de radiance obtenus à partir des données VIIRS-DNB du jeu synthétique assemblé à partir de radiances satellites mensuelles de l’année 2019 (voir la section 3 de ce document). On peut constater que seules 2 communes ont des radiances associées (Anost et La Petite-Verrière) dans la zone. Les autres communes soit pratiquent l’extinction, soit ont des radiances trop faibles pour être détectées.



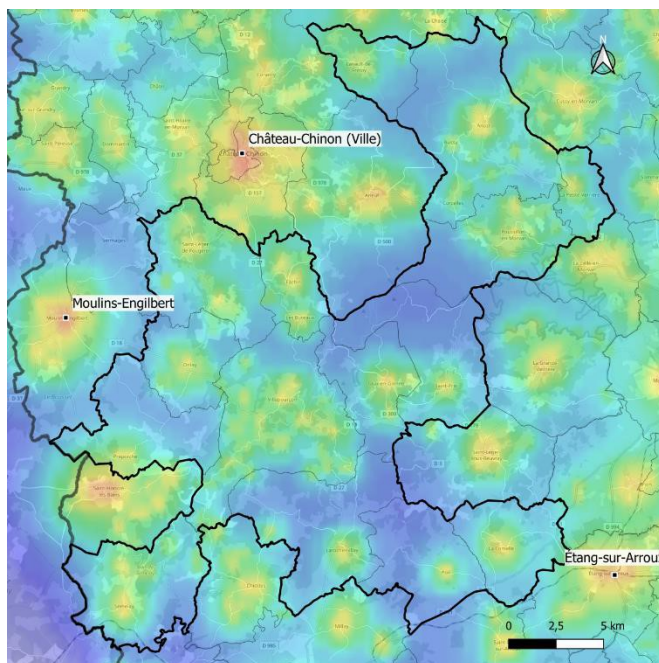


La simulation en cœur de nuit montre que l'ensemble de cette zone est très préservé du fait des extinctions pratiquées. La figure de gauche montre le résultat de cette simulation sur la potentielle zone cœur et les résultats des mesures Ninox en cœur de nuit sont aussi indiqués.

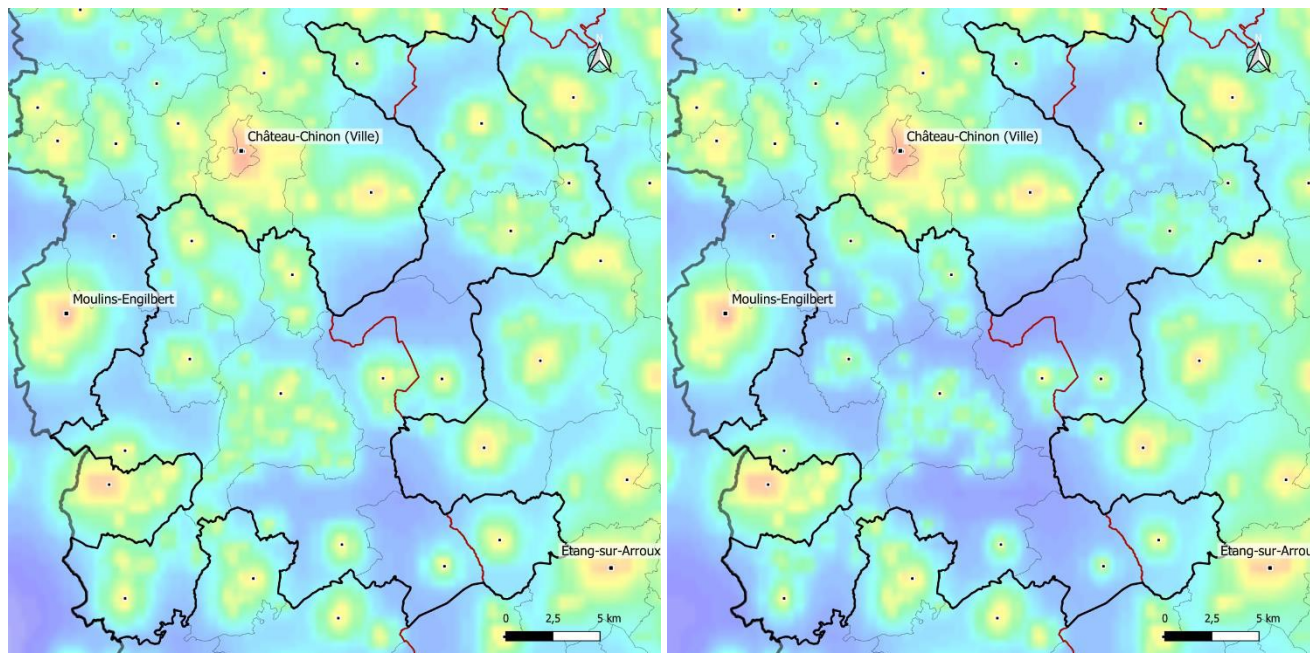
Seules les 3 communes de Anost, La Petite-Verrière et Villapourçon ont des halos associés. Etant donné la taille de ces communes, il est tout à fait envisageable que des extinctions en cœur de nuit puissent être pratiquées. La zone envisagée aurait alors une qualité de ciel de très bon niveau en cœur de nuit qui satisfaisait en tous points les critères édictés par l'IDA concernant la qualité de ciel minimale en cœur de nuit dans une zone cœur ($21,2 \text{ mag/arcsec}^2$ au minimum).

En extrémités de nuit, la zone ciblée possède encore une bonne qualité de ciel en plusieurs endroits comme le montre le résultat de simulation ci-contre.

Les nombreux petits hameaux de la commune de Villapourçon provoquent un mitage dont les effets seraient probablement réduits avec une mise en conformité du parc d'éclairage. Afin de visualiser quelles seraient les bénéfices d'une mise en conformité du parc d'éclairage sur la zone étudiée, une simulation a été réalisée en diminuant de 50% les flux lumineux des 781 dispositifs de la zone et en mettant leur ULR (la fraction du flux émise au-dessus de l'horizontale) à zéro.



Les cartes ci-dessous montrent le résultat obtenu pour ce scénario en extrémités de nuit avec abaissement de puissance et mise à zéro des ULR (carte de droite) et le met en regard avec la situation actuelle en extrémités de nuit (carte de gauche).



Scénario de diminution de la puissance et de mise à zéro des ULR de tous les points lumineux d'une potentielle zone cœur (à gauche situation actuelle en extrémités de nuit et à droite situation avec modification des parcs d'éclairage)

On peut constater une forte régression des halos associés au bourgs et hameaux et l'apparition de zones sombres beaucoup plus marquées. Cette simulation confirme donc qu'il est possible de limiter les nuisances lumineuses associées à l'éclairage public de la zone cœur potentielle identifiée.

6.2 Inventaire technique des points lumineux au format IDA

Dans le cadre d'une soumission d'un dossier de candidature de RICE à l'IDA, il est nécessaire de produire un inventaire détaillé des parcs d'éclairage public pour toutes les communes de la zone cœur et de la zone tampon. L'objectif est de connaître précisément la situation de départ, d'identifier les actions prioritaires et de suivre les progrès réalisés année après année quant à l'amélioration des parcs d'éclairage et à leur mise en conformité avec les contraintes émises dans le plan de gestion de l'éclairage attaché au dossier de RICE (*Light Management Plan*).

L'inventaire des points lumineux doit être présenté à l'IDA sous forme d'une matrice dans laquelle on énumère les dispositifs qui partagent les mêmes caractéristiques pour chaque commune. Par exemple, pour une commune donnée, on reportera 24 dispositifs à base de LED, d'une puissance de 42W, d'une température de couleur de 3000K et avec un ULR de 5%. Les champs souhaités dans cette matrice sont les suivants (les champs obligatoires sont indiqués en gras) :

- **Nom de la commune** ;
- Destination du dispositif (e.g. route secondaire, parking, mise en valeur) ;
- Type du lampadaire (e.g. lanterne de style Vence)
- **Type de la lampe** (e.g. sodium haute-pression, LED) ;
- Inclinaison du dispositif (e.g. à plat, faiblement incliné, fortement incliné) ;
- Présence d'une vasque en verre et type de verre (e.g. verre dépoli) ;
- **ULR** ou éventuellement **ULOR** (e.g. 10%) ;
- **Extinction ou régulation de puissance** (e.g. coupure entre 23h et 5h) ;
- **Puissance de la source** (e.g. 100W) ;
- **Température de couleur de la lampe** (e.g. 3000K) ;
- **Nombre de sources dans la commune avec un jeu de caractéristiques identiques** ;

- **Conformité avec le plan de gestion de l'éclairage** (oui / non).

L'obtention de toutes ces informations sur les périmètres d'une zone cœur et d'une zone buffer dans une RICE est donc potentiellement un gros travail. DarkSkyLab a développé un outil qui, à partir de la base de données consolidée des points lumineux, peut produire la matrice dans le format requis par l'IDA. Il faut bien sûr que les informations nécessaires soient disponibles pour chaque point lumineux dans la base.

A titre d'exemple, la matrice des 15 communes de la zone cœur potentielle envisagée dans la section précédente (chapitre 6.1) de ce document a été produite à partir des informations disponibles. Le résultat est montré ci-dessous.

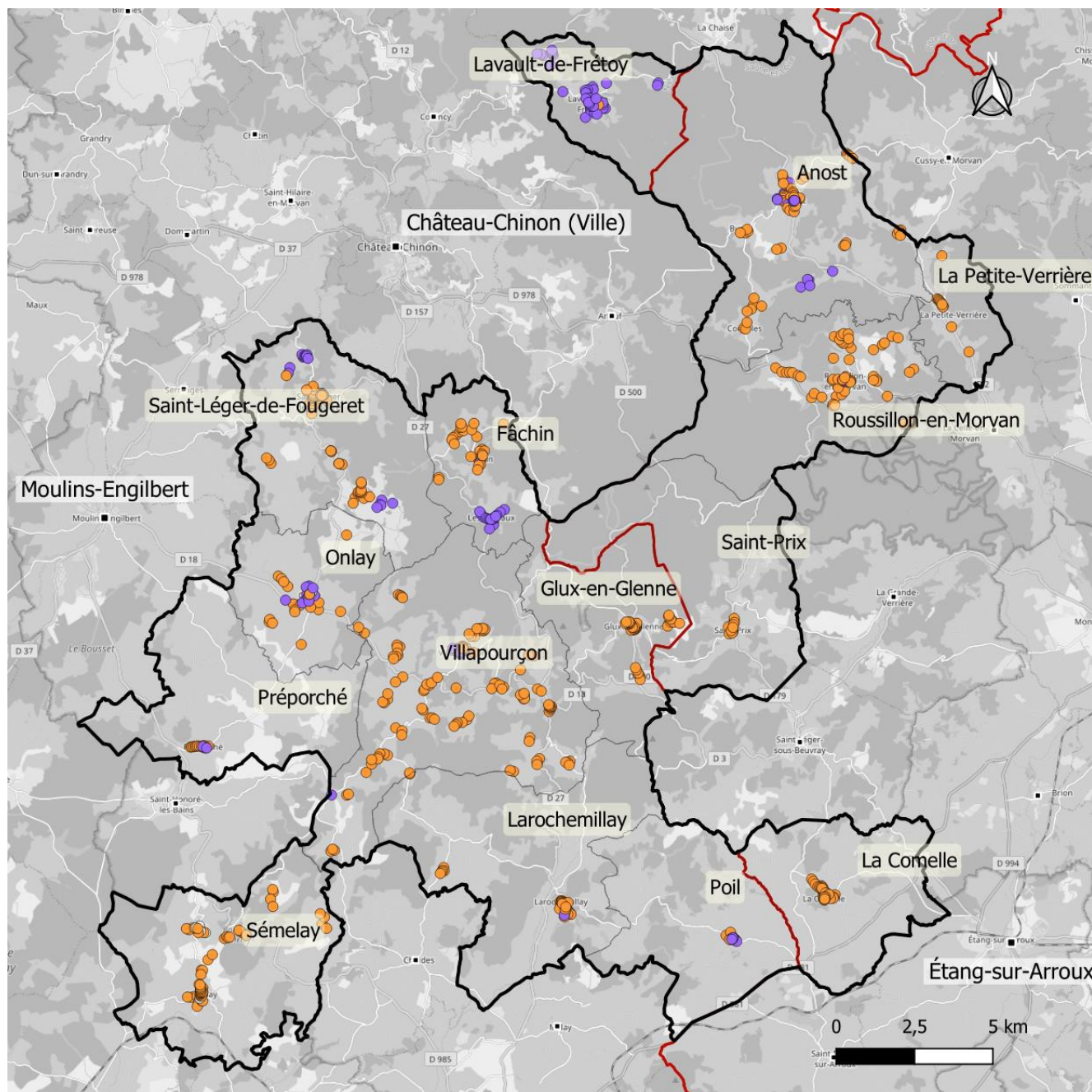
Commune	Lampe	Puissance	ULR	Température de couleur	Nombre
Anost	Sodium haute pression	70	?	?	42
		100	?	?	27
		250	?	?	1
	LED	15	?	?	3
		32	?	?	1
		44	?	?	4
		53	?	?	11
Fâchin	Sodium haute pression	70	?	?	1
		100	?	?	27
		150	?	?	2
	LED	51	?	?	19
Glux-en-Glenne	Sodium haute pression	50	?	?	1
		70	?	?	9
		100	?	?	43
	Inconnu	100	?	?	1
	Halogénures métalliques	250	?	?	1
La Comelle	Sodium haute pression	70	?	?	8
		100	?	?	20
		150	?	?	6
		250	?	?	2
		400	?	?	1
La Petite-Verrière	Sodium haute pression	100	?	?	11
Larochemillay	Sodium haute pression	70	?	?	32
		100	?	?	7
	Halogénures métalliques	400	?	?	1
	LED	46	?	?	1
Lavault-de-Frétoy	LED	45	?	?	36
		64	?	?	2
	Sodium haute pression	70	?	?	1
Onlay	Sodium haute pression	70	?	?	14
		100	?	?	5
		150	?	?	1
	LED	50	?	?	1
		51	?	?	17
	Halogénures métalliques	100	?	?	1
			250	?	?
Poil	Ballon fluo	80	?	?	1
	Sodium haute pression	70	?	?	6
		100	?	?	8
	LED	46	?	?	1

		51	?	?	2
		73	?	?	2
Préporché	Sodium haute pression	100	?	?	14
	LED	48	?	?	2
Roussillon-en-Morvan	Sodium haute pression	70	?	?	50
		100	?	?	6
		150	?	?	2
		250	?	?	3
	LED	56	?	?	4
Saint-Léger-de-Fougeret	LED	43	?	?	5
		51	?	?	10
	Sodium haute pression	70	?	?	16
		100	?	?	33
		150	?	?	11
Saint-Prix	Sodium haute pression	70	?	?	9
		100	?	?	12
		400	?	?	1
Sémelay	Ballon fluo	80	?	?	10
		125	?	?	1
	Sodium haute pression	70	?	?	16
		100	?	?	26
		150	?	?	20
	Halogénures métalliques	70	?	?	3
		150	?	?	2
Villapourçon	LED	20	?	?	5
		46	?	?	1
		48	?	?	3
		51	?	?	15
		145	?	?	2
	Sodium haute pression	70	?	?	3
		100	?	?	87
		150	?	?	24
		250	?	?	1
	Inconnu	100	?	?	3

On notera dans ce tableau que les informations de température de couleur et d'URL ne sont pas disponibles. Si ces informations avaient été disponibles, elles auraient potentiellement créé d'autres subdivisions de catégories de points lumineux dans chaque commune (on aurait par exemple pu avoir deux catégories de LED à 3000K et 3500K).

En utilisant ce tableau, on peut facilement identifier les différents dispositifs d'éclairage public dans une commune donnée. Par exemple, la commune de Glux-en-Glenne possède 43 dispositifs à sodium haute-pression de 100W et 9 dispositifs de 70W.

La carte ci-dessous montre les points lumineux des 15 communes de la zone étudiée (en orange les lampes à sodium haute-pression et en violet les lampes LED). On peut constater que l'écrasante majorité des lampes sont à sodium haute-pression et à LED. Il y a seulement 6 lampes à halogénures métalliques et 11 lampes ballon fluo (non visibles sur la carte à cette échelle car cachées par les autres points lumineux).



Points d'éclairage public avec leurs types de lampe sur les 15 communes d'une potentielle zone cœur (en orange les lampes à sodium haute-pression et en violet les lampes LED)

La matrice d'inventaire des points lumineux connus sur l'ensemble des communes du PNR est fournie avec ce rapport.

6.3 Contribution d'Autun à la pollution lumineuse sur Glux-en-Glenne

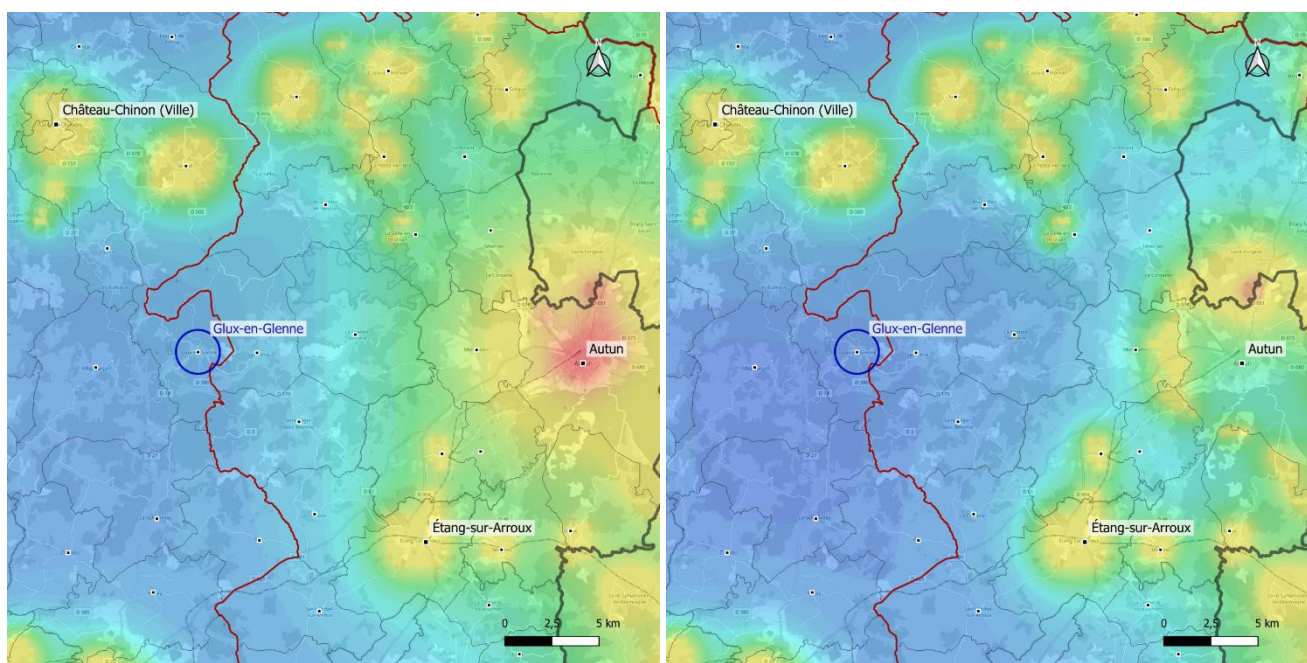
Le site de Glux-en-Glenne est dans une situation particulière puisqu'il se trouve à la limite de la zone plus sombre du PNR à 20 kilomètres à l'ouest d'Autun. Il est apparu qu'il serait intéressant de connaître la contribution de la ville d'Autun à la pollution lumineuse sur Glux-en-Glenne.

Pour cela, deux simulations ont été réalisées dans des conditions de ciel clair légèrement dégradées de manière à accentuer l'impact de la pollution lumineuse à une distance d'une vingtaine de kilomètres et un jeu de paramètres de simulation spécifique a été utilisé (les relevés Ninox sur le site de Glux-en-

Glenné montrent en effet que les conditions atmosphériques influent notablement sur les niveaux de brillance du ciel de ce site – voir la section 4.5). Les deux simulations réalisées sont les suivantes :

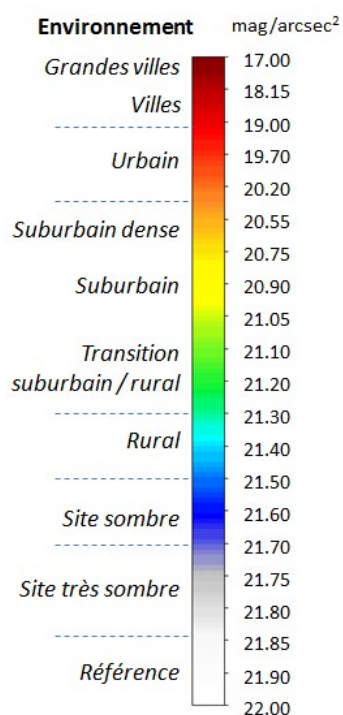
1. Simulation en cœur de nuit dans la situation actuelle ;
2. Simulation en cœur de nuit en réalisant une extinction de l'éclairage sur la commune d'Autun. Cette « extinction » se fait simplement en supprimant les radiances satellite sur l'emprise de la commune.

Les résultats de ces deux simulations sont présentés dans les cartes ci-dessous (à gauche la situation actuelle et à droite la situation après extinction de l'éclairage d'Autun). Le site de Glux-en-Glenné est repéré par un cercle bleu sur les cartes.



Situation actuelle

Situation avec extinction de l'éclairage d'Autun



On peut remarquer sur la carte que la qualité de ciel s'est améliorée sur Glux-en-Glenné dans la situation d'extinction si l'on se rapporte à l'échelle de couleur rappelée ci-contre (on passe d'un ciel rural à un ciel de site sombre). Il est à noter aussi que toute la radiance de l'agglomération d'Autun n'a pas été supprimée (elle va au-delà des limites de la commune), et le résultat présenté ici doit donc être considéré comme le bénéfice minimum qu'apporterait un scénario d'extinction de la ville d'Autun.

Dans les conditions de ciel clair légèrement dégradée utilisées pour la simulation, on relève un NSB (luminance zénithale) de **21,47 mag/acrsec²** sur le site de Glux-en-Glenné dans la première situation et de **21,54 mag/arcsec²** dans la situation d'extinction. L'échelle de NSB étant une échelle logarithmique, une augmentation du NSB de 0,07 magnitude sur un ciel sombre constitue une amélioration significative de la qualité de ciel.

On peut donc en déduire que la ville d'Autun, bien qu'elle soit située à une vingtaine de kilomètres de Glux-en-Glenné, a une influence sur la qualité de ciel au zénith de cette commune, spécialement dans des conditions intermédiaires de ciel clair.

7 Conclusion

Le Parc naturel régional du Morvan a la particularité d'être composé de nombreuses communes qui pratiquent l'extinction de l'éclairage public. La conséquence de ces extinctions est que le PNR bénéficie en cœur de nuit de ciels de grande qualité comme on en trouve rarement sur le territoire de la France métropolitaine. En extrémités de nuit, donc sans extinction, la situation est assez différente puisque le grand nombre de bourgs et de hameaux sur le territoire induit un effet de mitage qui, sans induire des niveaux très élevés de pollution lumineuse, dégrade dans une certaine mesure la qualité de ciel sur la plus grande partie du territoire du PNR.

Les données de points lumineux pour les communes du PNR appartenant aux départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre, de la Saône-et-Loire et de l'Yonne ont permis de réaliser des simulations à haute résolution qui montrent la situation en extrémités de nuit. Sur la base de ces données, une analyse statistique des types de lampe a montré que la plupart des communes du Parc sur les départements de la Côte-d'Or, de la Nièvre et de la Saône-et-Loire n'ont pas encore entamé un processus de rénovation de leurs parcs d'éclairage et qu'elles possèdent à ce jour essentiellement des lampes à sodium haute pression. Il est à noter que le pourcentage de lampes à vapeurs de mercure (« ballon fluo ») sur ces départements est très faible et très largement inférieur à la moyenne nationale. Le passage à la technologie LED pourra donc se faire en respectant les termes de l'arrêté du 28 décembre 2018 qui spécifie en particulier que les températures de couleur des dispositifs à LED ne doivent pas dépasser 3000K. La situation est différente pour les communes du PNR sur le département de l'Yonne où le processus de rénovation des parcs d'éclairage est déjà largement entamé. Le nombre de dispositifs à vapeur de mercure devait initialement être important et ce type de lampe ne représente plus que 12% des parcs d'éclairage aujourd'hui. Les dispositifs à base de LED constituent à ce jour 50% des parcs d'éclairage des communes du PNR sur le département de l'Yonne, et il sera important de vérifier les températures de couleur de ces dispositifs (cette information n'était pas disponible dans les bases de données fournies pour cette étude).

Les très nombreuses mesures de qualité de ciel réalisées avec les systèmes Ninox fournis par DarkSkyLab (17 sites sur le territoire du PNR du Morvan) ont confirmé les prédictions des cartes de simulation de la pollution lumineuse, c'est-à-dire que l'on obtient en cœur de nuit des ciels de grande qualité à de nombreux endroits du territoire, essentiellement dans le centre et le sud-ouest du Parc. Seules les zones situées dans les parties nord et nord-est du PNR voient leur ciel impacté de manière significative par la pollution lumineuse en cœur de nuit. Des simulations ont été réalisées pour visualiser la situation en extrémités de nuit avant que les extinctions des communes qui les pratiquent ne soient mises en œuvre. Ces simulations ont été réalisées en utilisant les données de points lumineux fournies par les syndicats d'énergie. Du fait de la forte densité de communes sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan et de la présence de nombreux hameaux éclairés, on observe un « mitage » assez important du paysage nocturne qui change de manière significative les niveaux de brillance du ciel sur le territoire en extrémités de nuit.

Dans le cadre de la soumission d'un dossier de candidature à l'IDA pour le label RICE, ce rapport a permis de mettre en évidence la possibilité de création d'une zone cœur sur le territoire du PNR qui inclurait un nombre limité de points lumineux. Les mesures Ninox sur le terrain ont démontré que les niveaux de brillance de ciel en cœur de nuit sur cette zone vont au-delà des critères imposés par l'IDA (l'organisation en charge de l'attribution du label) et il ne serait donc pas nécessaire de procéder à la collecte de nouvelles données dans le cadre de la constitution d'un dossier RICE. Des données supplémentaires seront par contre nécessaires afin de compléter l'inventaire des sources lumineuses avec le niveau d'information requis par l'IDA. En effet, un inventaire exhaustif dans un format spécifique

est demandé dans le cadre de la soumission du dossier RICE sur l'ensemble de la zone cœur et de la zone tampon de la proposition de RICE. Certaines de ces données sont déjà disponibles, mais il manque à ce jour des informations importantes concernant en particulier les ULR et les températures de couleur des LED déjà installées.

Les simulations réalisées selon différents scénarios (extinction ou mise en conformité) ont permis de montrer qu'une adaptation des usages et de la technologie permettrait de réduire sensiblement la pollution lumineuse sur le territoire du Parc naturel régional du Morvan, en particulier dans la potentielle future zone cœur de RICE. Ces simulations ont également permis de montrer la contribution de la ville d'Autun à la pollution lumineuse sur le site de Glux-en-Glenne qui ambitionne d'accueillir un observatoire astronomique.