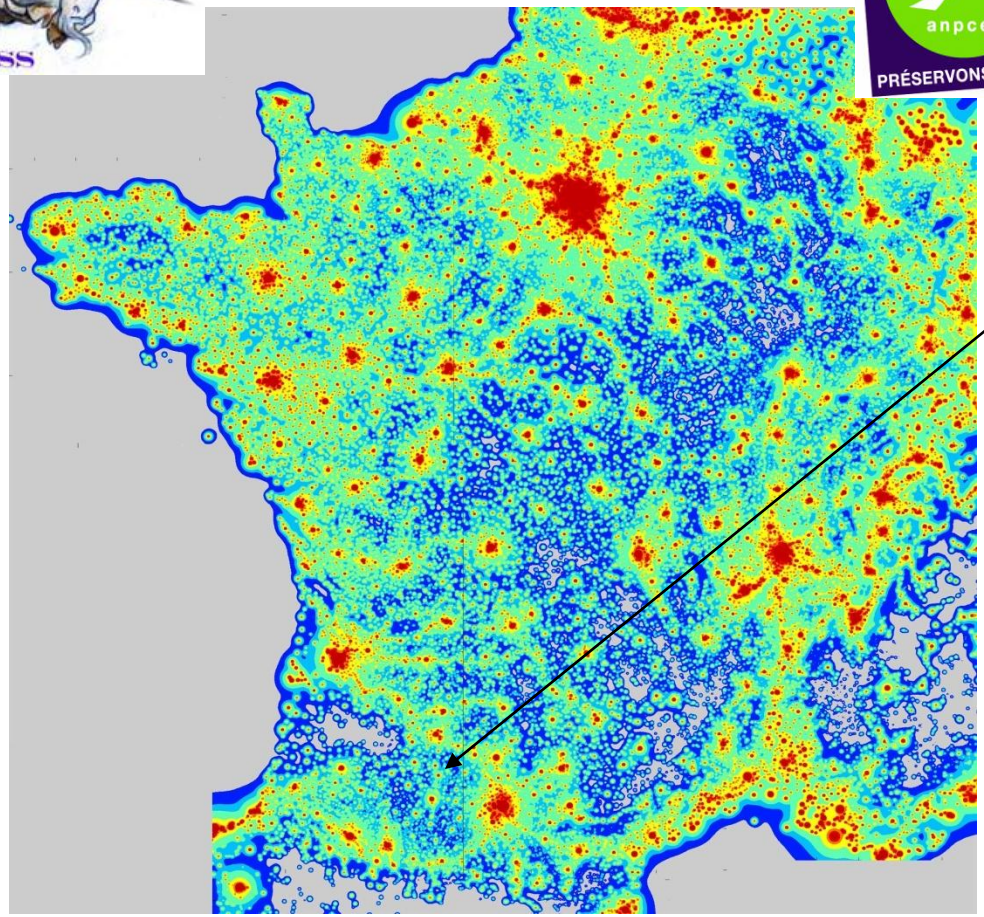
Progrès récents dans la modélisation de la pollution lumineuse : élaboration de cartes plus fiables

Nicolas BESSOLAZ



Fleurance

3ème Congrès National pour la protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes
23-24-25 octobre 2009 Fleurance

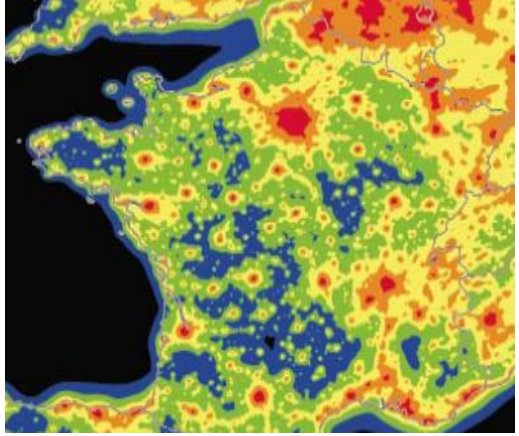
Travaux antérieurs

Atlas Cinzano 2001-2004

Mesures par le satellite DSPM avec une précision spatiale de seulement ~ 2 km

Modèle de propagation et diffusion de la lumière de Garstang 1989

Non prise en compte globale des effets d'altitude et du masquage par le relief



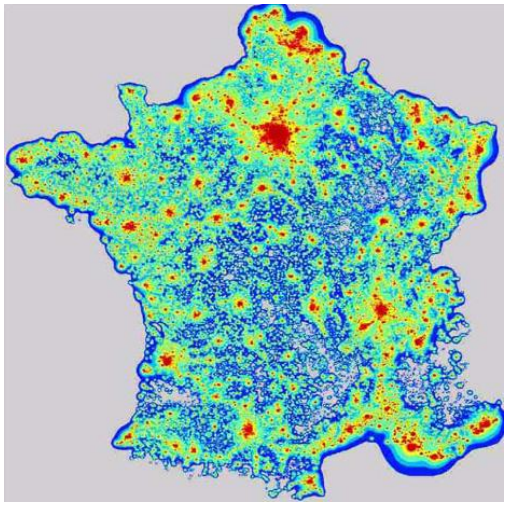
Carte LICORNESS/ANPCEN 2002

Catalogue de sources BVC de population des 36000 communes de France avec une précision spatiale de 250 m

Loi empirique de Walker pour des conditions météorologiques fixés (grande transparence) et un type d'émission de luminaires fixé

Prise en compte partielle des effets d'altitude et pas d'effet du masquage par le relief

Projection cartographique sommaire avec problème de distortion pour superposition avec des cartes IGN par exemple

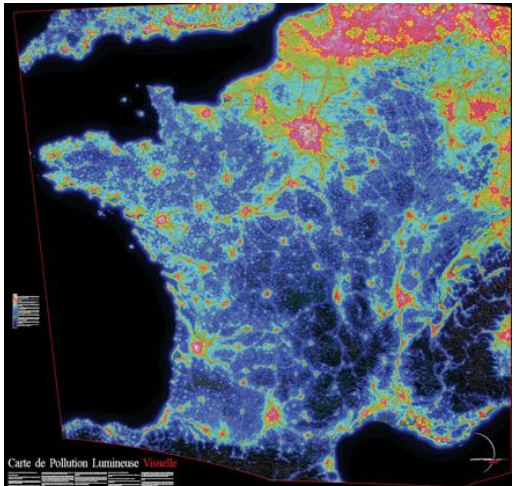


Carte AVEX 2005

Base de données toponymique (hameaux, lieux-dits, ZI, trafic routier, villes étrangères) et d'altitude complètes prise en compte avec bonne résolution spatiale

Méthode graphique de masques sucessifs basée sur une série de photos longue pose prise sur le terrain

Mais méthode empirique non prédictive avec calibration had hoc sur les cartes Licorness en particulier et effet d'altitude trop optimiste



Améliorations apportées aux cartes LICORNESS/ANPCEN

Projection des coordonnées géographiques en Lambert II étendu conforme aux cartes géographiques IGN, Michelin pour une superposition directe et une localisation précise des sites d'observation.

Base de données BVC complété pour les villes étrangères (Suisse, Italie, Espagne, Angleterre, Allemagne, Belgique, Luxembourg) et division des communes étendu en superficie en hameaux pour les régions de montagne amenant la base à plus de 60000 entrées

Utilisation du relevé topographique du satellite SRTM avec une précision spatiale de 100m pour intégrer très précisément les effets d'altitude et de masquage par le relief

Implémentation d'un modèle de propagation et de diffusion de la lumière similaire à Cinzano et Garstang avec un modèle d'émission des sources multiples pouvant prendre en compte la spécificité de l'éclairage de chaque commune (type de lampadaires utilisés (ULOR, u), spectre des lampes, extinction nocturne)

Calibration globale des sources lumineuses à partir des données statistiques de l'ADEME

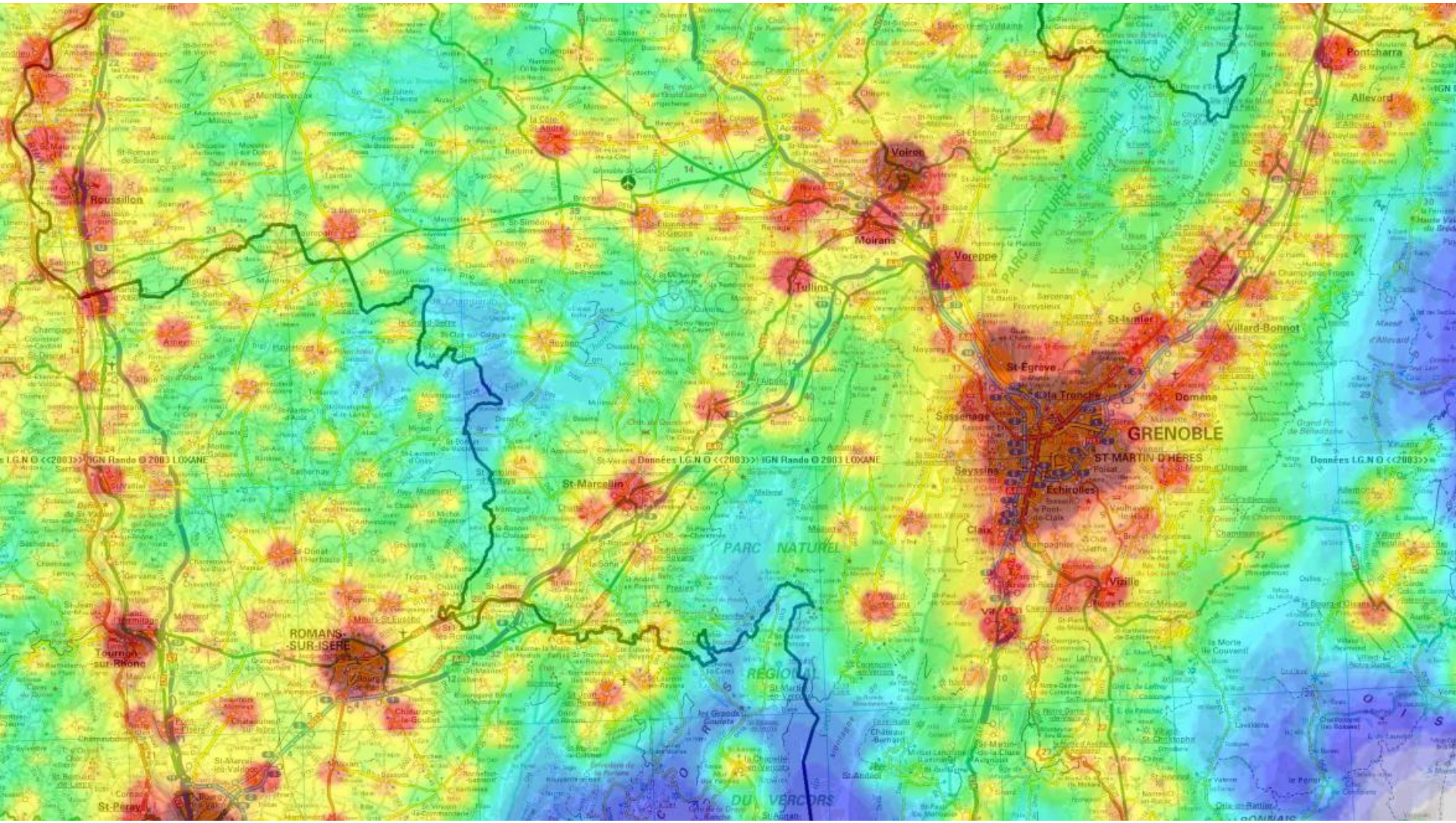
Etude de l'influence des conditions météo sur la pollution lumineuse

Intégration d'une échelle de dégradé de couleur pour juger au mieux de la qualité d'un site sur les cartes

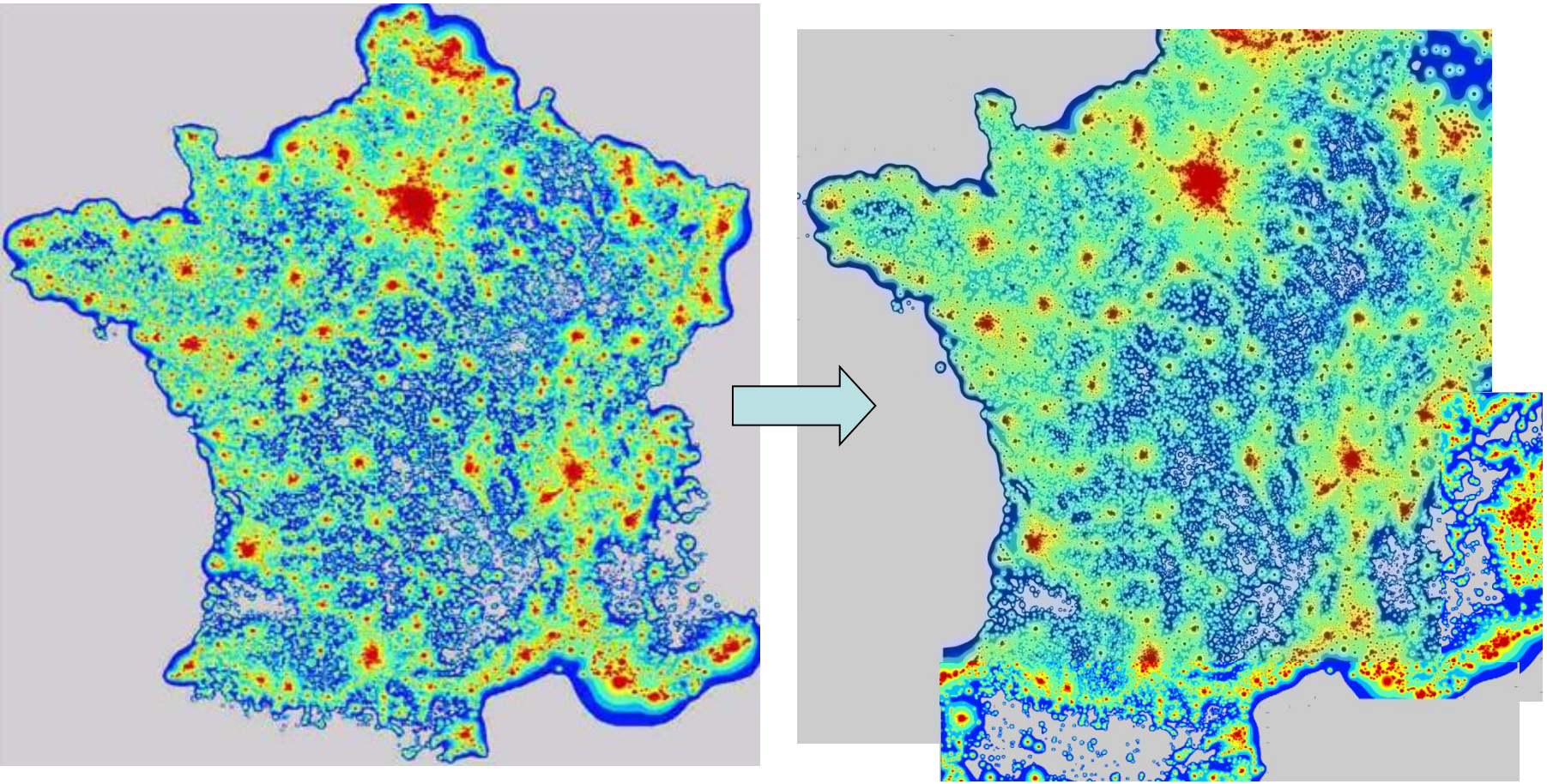
Effet de l'instauration de nouvelles pratiques en éclairage public pour contrôler efficacement la pollution lumineuse (ulor, puissance des sources, spectres)

Calibration des indices de qualité de site en échelle de magnitudes de fond de ciel en bande V ou donnée par le sqm pour un suivi de l'évolution de la pollution lumineuse au cours du temps

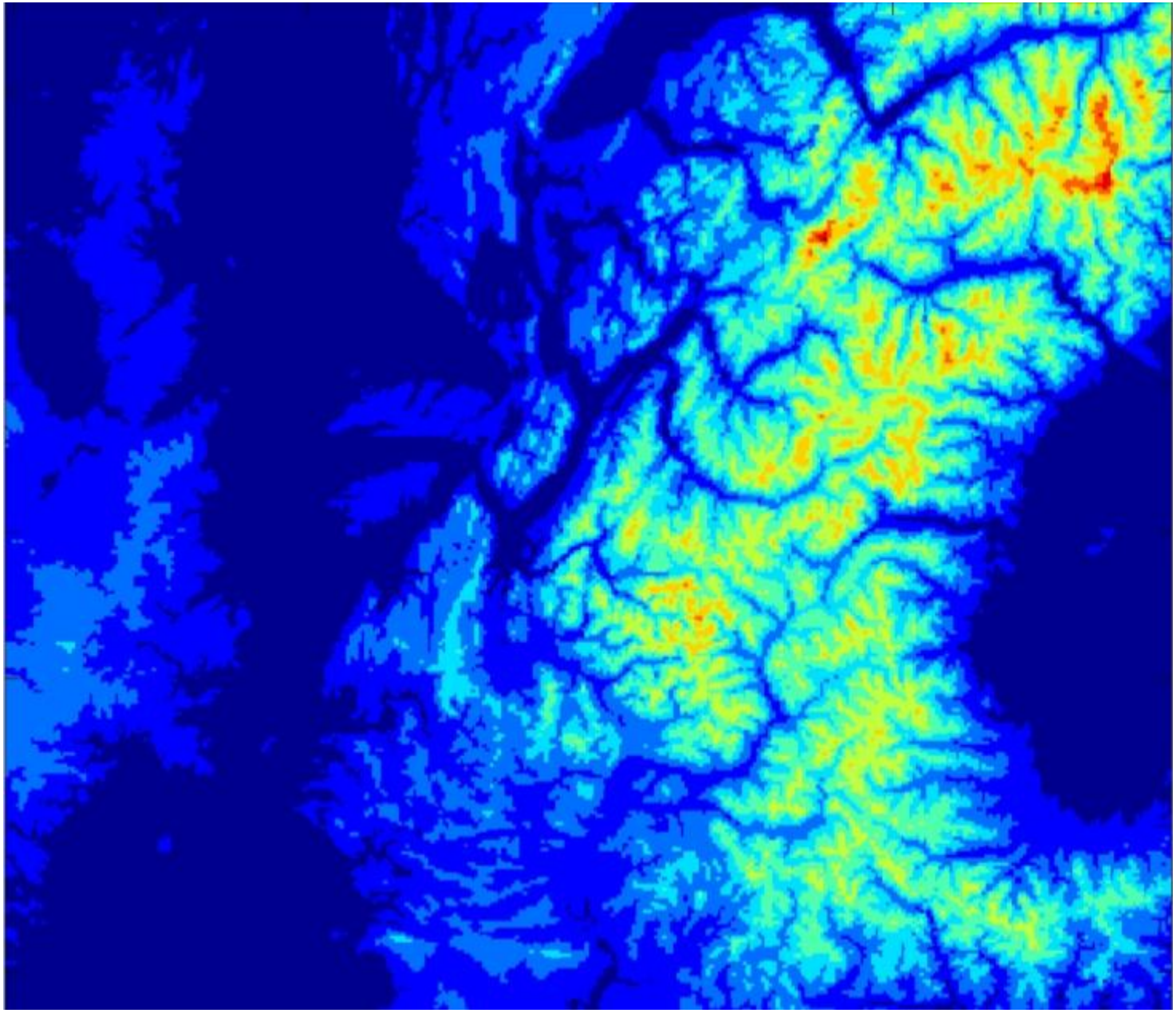
Superposition directe des cartes à grande échelle



Base de données des sources élargie à l'étranger

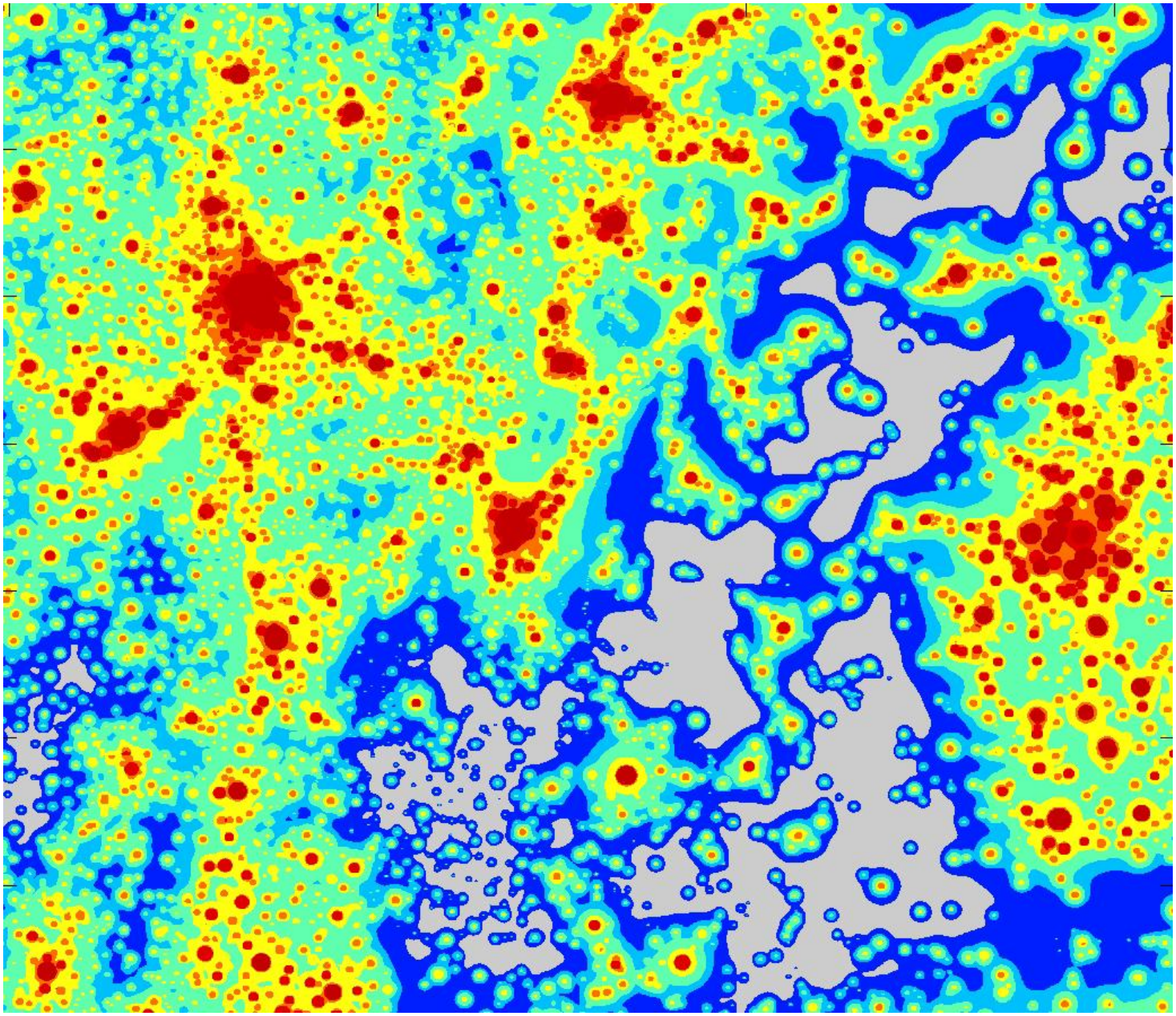


Base de données d'altitude SRTM incluse

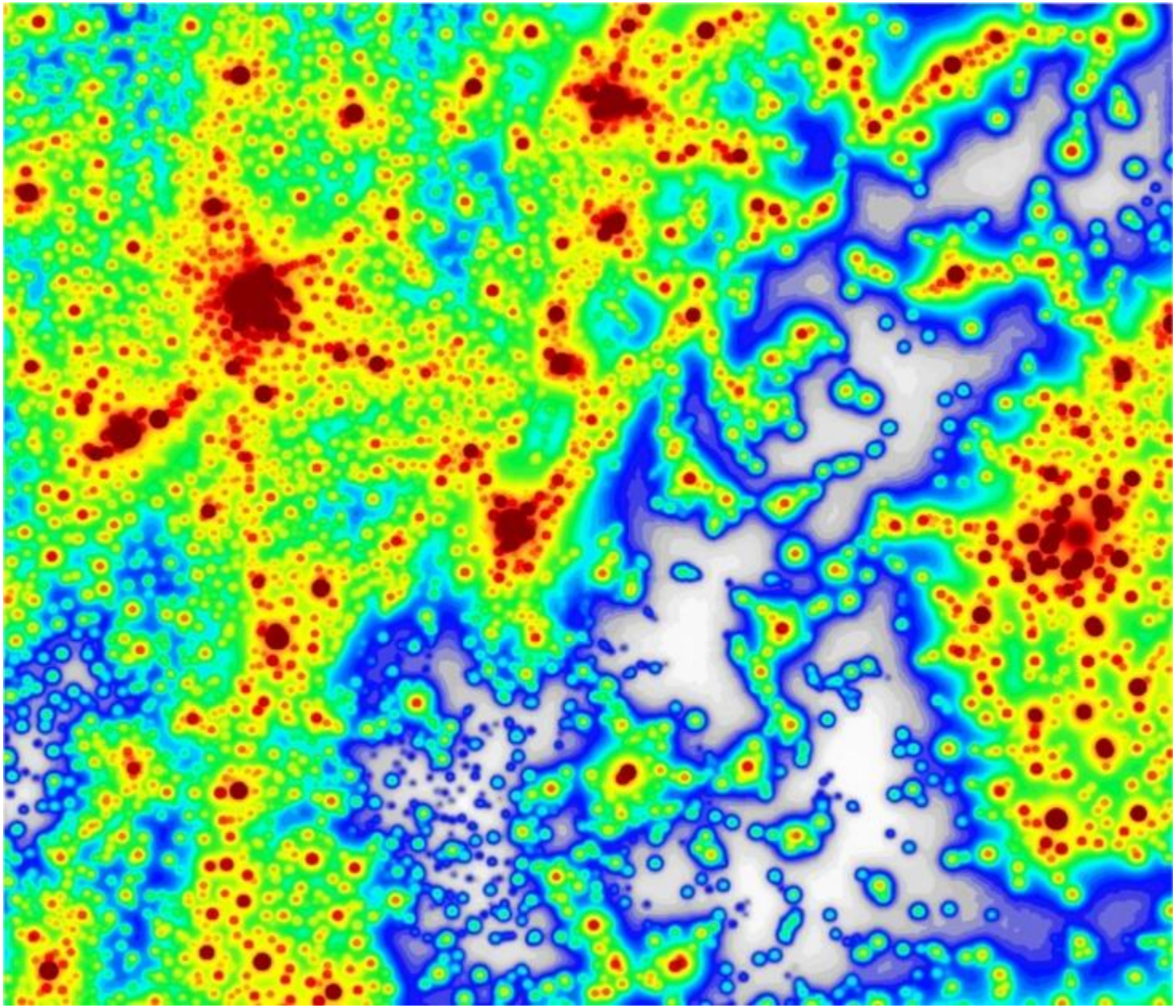


Précision spatiale de 100 m au sol et < 20m en altitude

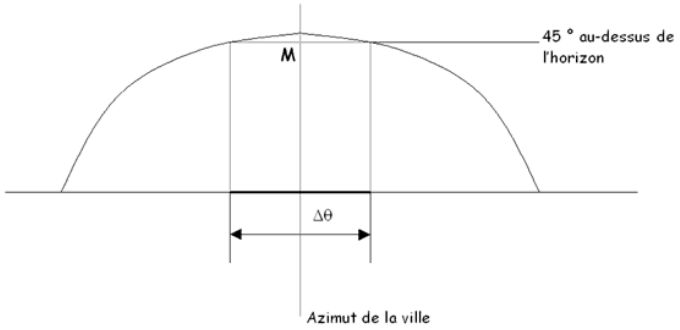
Echelle de couleur classique

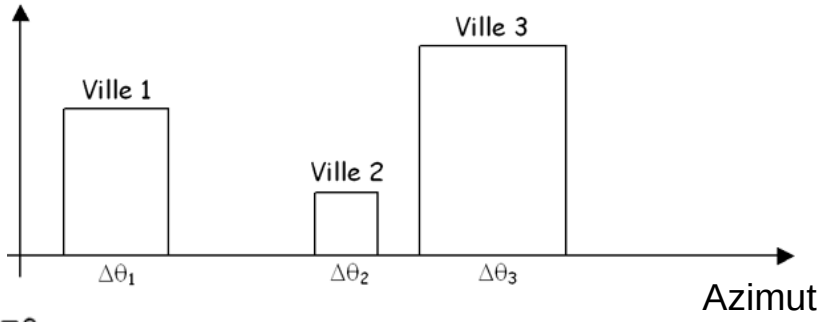


Echelle de couleur en dégradé



Calcul de l'indice de qualité de ciel





$$q = \frac{\text{Luminosité du fond de ciel du site à 45°}}{\text{Luminosité du fond de ciel naturel à 45°}}$$ moyenné en azimut

	Indice de pollution lumineuse	Qualité du ciel	Niveau sur l'échelle de Bortle	Perte de Magnitude du fond de ciel
	q > 32	Très mauvaise	N > 7.5	d > 3,8
	10 < q ≤ 32	Mauvaise	6,5 < N ≤ 7,5	2,6 < d ≤ 3,8
	4 < q ≤ 10	Passable	5,5 < N ≤ 6,5	1,75 < d ≤ 2,6
	2,5 < q ≤ 4	Moyenne	4,5 < N ≤ 5,5	1,35 < d ≤ 1,75
	1 < q ≤ 2,5	Correcte	4,0 < N ≤ 4,5	0,75 < d ≤ 1,35
	0,5 < q ≤ 1	Bonne	3,5 < N ≤ 4,0	0,45 < d ≤ 0,75
	0,32 < q ≤ 0,50	Très bonne	3,0 < N ≤ 3,5	0,3 < d ≤ 0,45
	0,10 < q ≤ 0,32	Excellent	2,0 < N ≤ 3,0	0,1< d ≤ 0,3
	q ≤ 0,10	Référence	N < 2	d < 0,1

Site péri-urbain (orange) : niveau 6 sur l’échelle de Bortle

Halos englobant une grande partie du ciel

Voie lactée faiblement discernable au zénith lors des meilleurs nuits

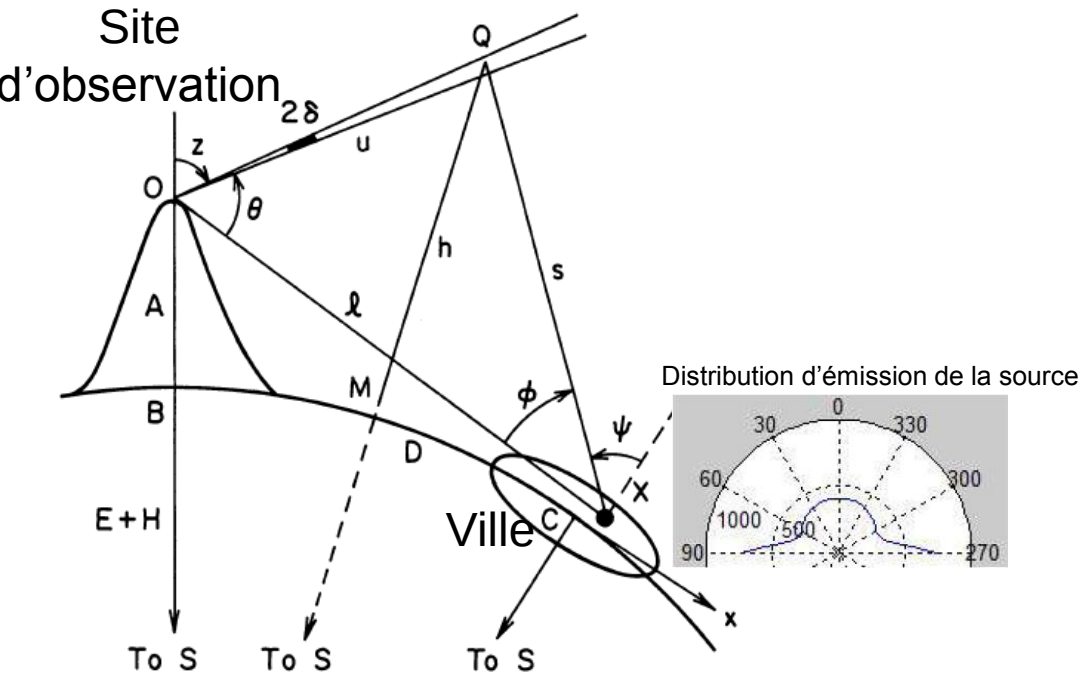
Site rural (vert) : niveau 4 sur l'échelle de Bortle

Voie lactée bien visible jusqu'à 10-15° de l'horizon

Dômes de pollution lumineuse évidents dans certaine directions jusqu'à 40° de hauteur.

Eléments physiques du modèle de propagation

Géométrie de base



Garstang 1989

Altitude de la source d'émission

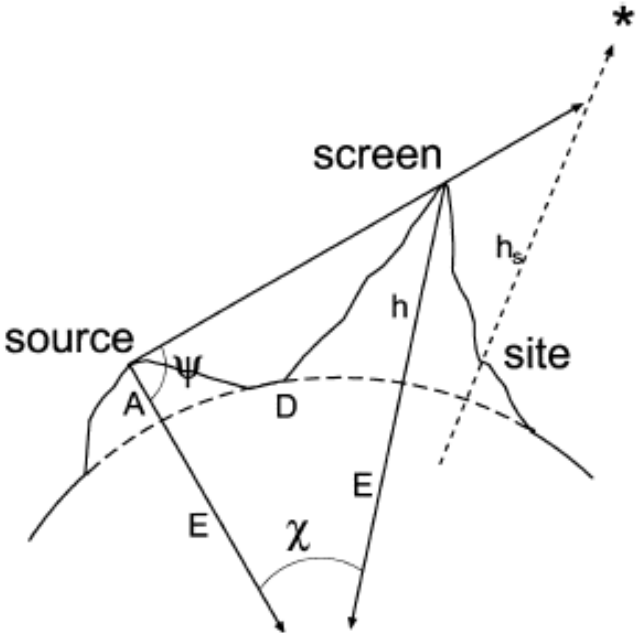
Altitude du site d'observation

Stratification verticale de l'atmosphère

Courbure de la Terre prise en compte

Effets d'extinction le long des chemins parcourus

Effet de masquage par le relief



Cinzano et al 2001

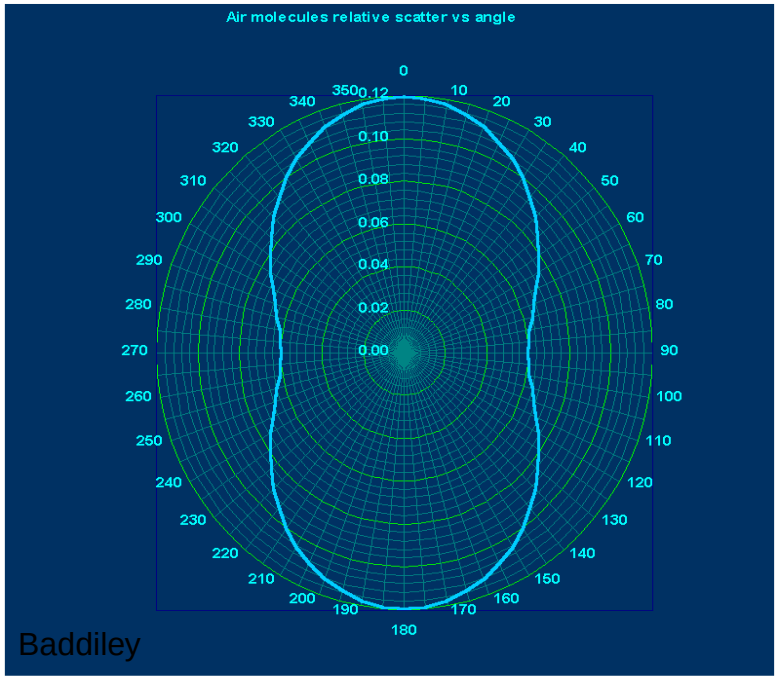
Effet d'écran pris en compte près du zénith

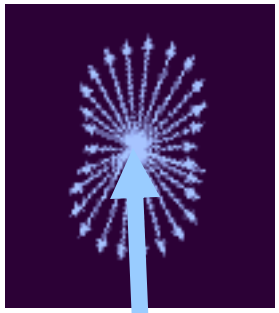
Nb de molécules pouvant diffuser la lumière réduit et fraction du flux lumineux de la source masquée

Calcul systématique autour de chaque ville en mesurant l'obstruction maximale pour différents azimuts

La diffusion de la lumière

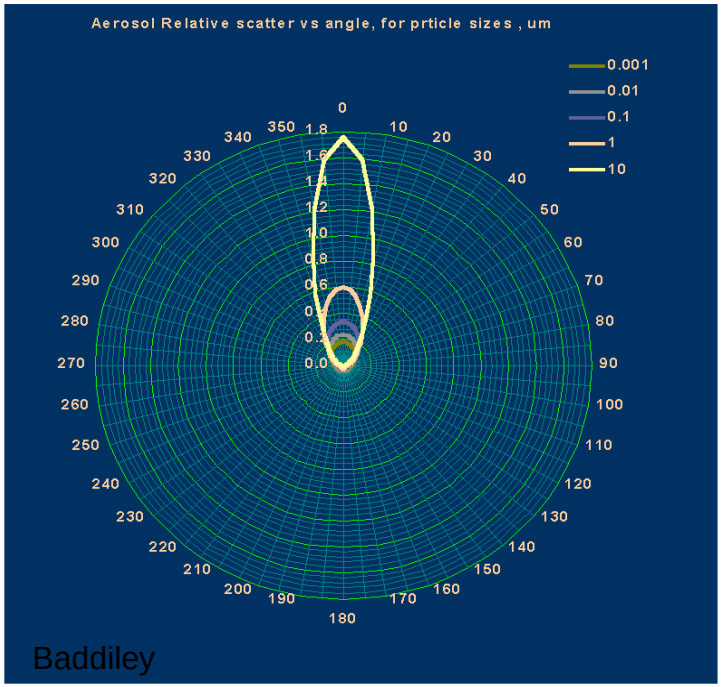
Par les molécules (diffusion Rayleigh)

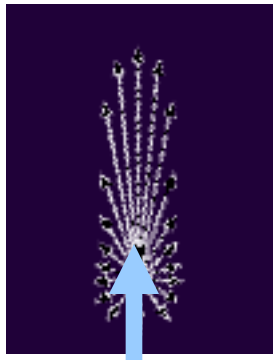




Echelle de hauteur
~ 8 km

Par les aérosols (diffusion de Mie)

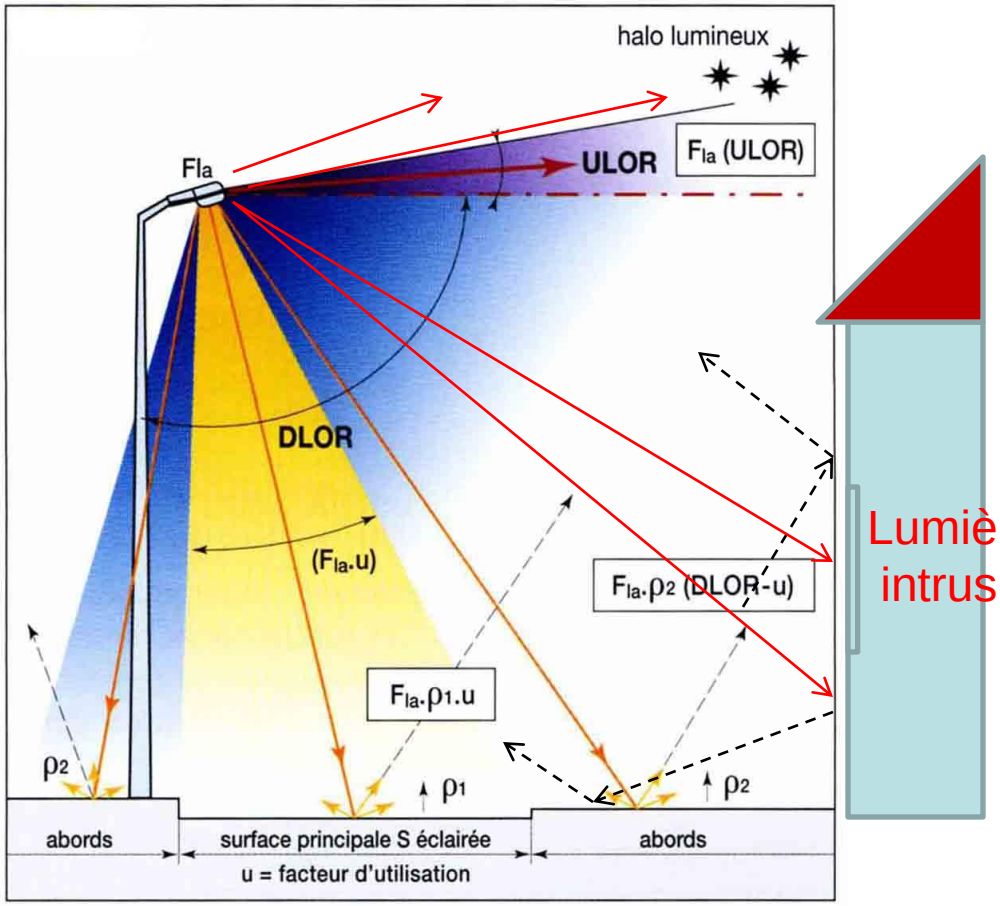




Echelle de hauteur
~ 1 km

Typiquement
100 X plus
efficace !

La formation du halo lumineux des villes



$$UPF = F_{la}\,[\,ULOR + \rho_1.u + \rho_2\,(DLOR - u)\,] \quad (1)$$

Flux directement émis au dessus de l'horizontale ULOR qui semble négligeable en intensité pour la plupart des luminaires d 'éclairage fonctionnel

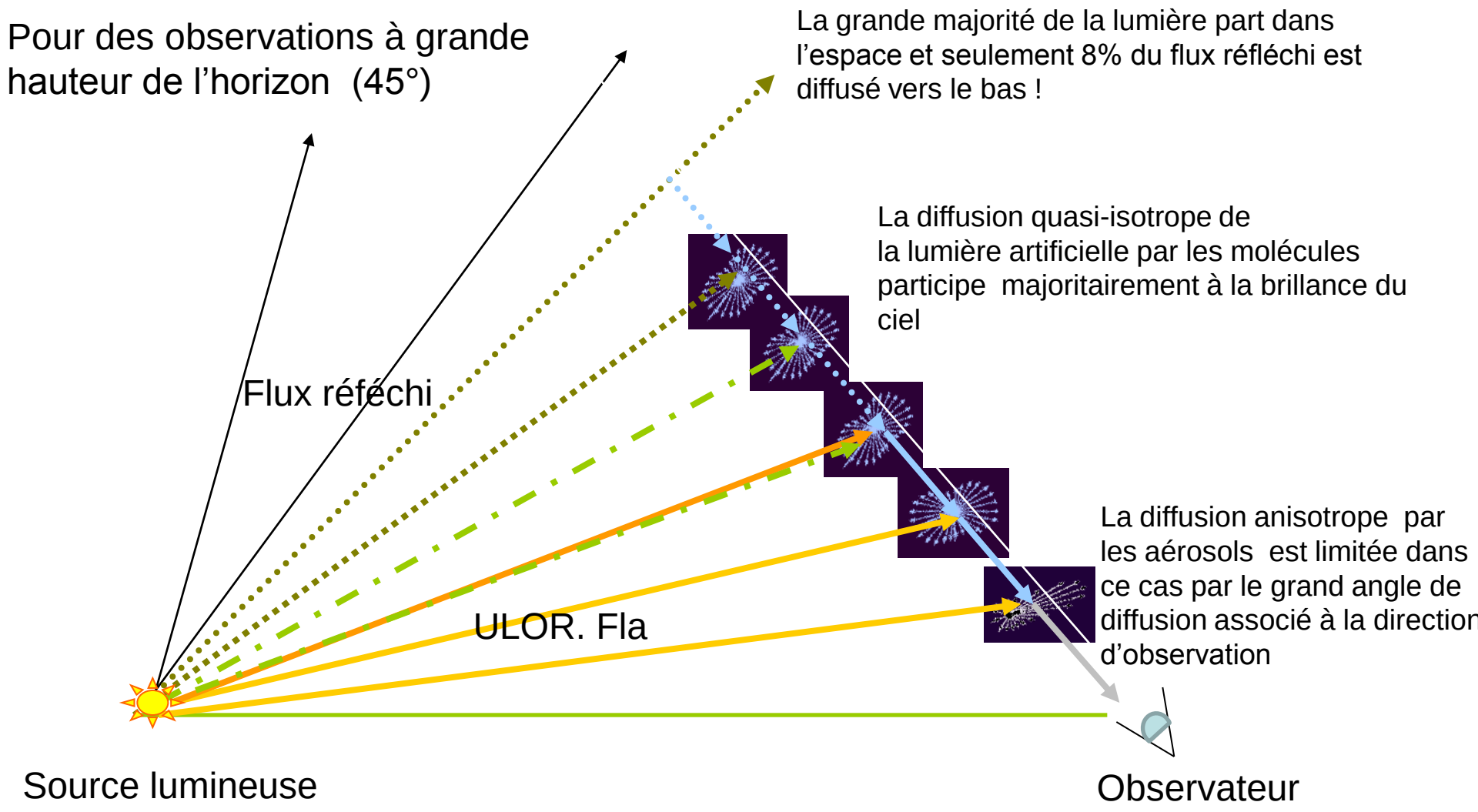
ULOR < 1-3% Fla

Lumière intrusive !

Flux réfléchi utile et sur les abords avec possibilités de réflexions multiples sur les obstacles pouvant atténuer le flux émis vers le ciel
Compris entre 7 et 15% Fla
en tenant compte revêtements route standard et peu variable d'un luminaire à l'autre

Pour les éclairagistes : ULOR < 1/10 Flux réfléchi bien suffisant ! Pourtant ….

L'importance de la direction d'émission initiale de la lumière

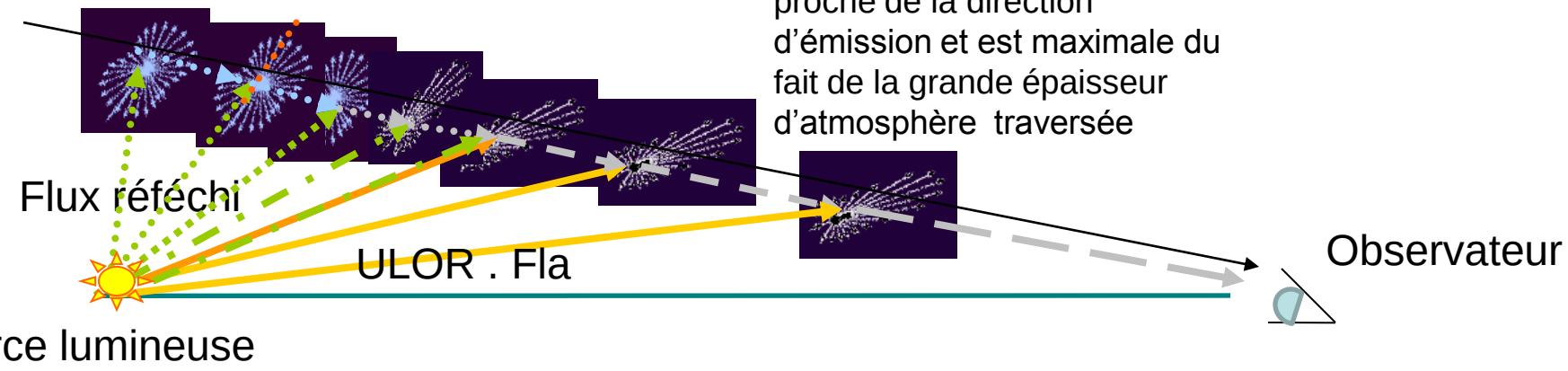


L'importance de la direction d'émission initiale de la lumière

Pour des observations proches de l'horizon (15°)

La diffusion quasi-isotrope de la lumière artificielle par les molécules participe plus faiblement à la brillance du ciel du fait de l'effet d'altitude

La diffusion anisotrope par les aérosols domine ici car la direction de diffusion est très proche de la direction d'émission et est maximale du fait de la grande épaisseur d'atmosphère traversée



Le flux directement émis vers le ciel est donc prépondérant dans la formation des halos lumineux et donc de la pollution lumineuse à grande échelle

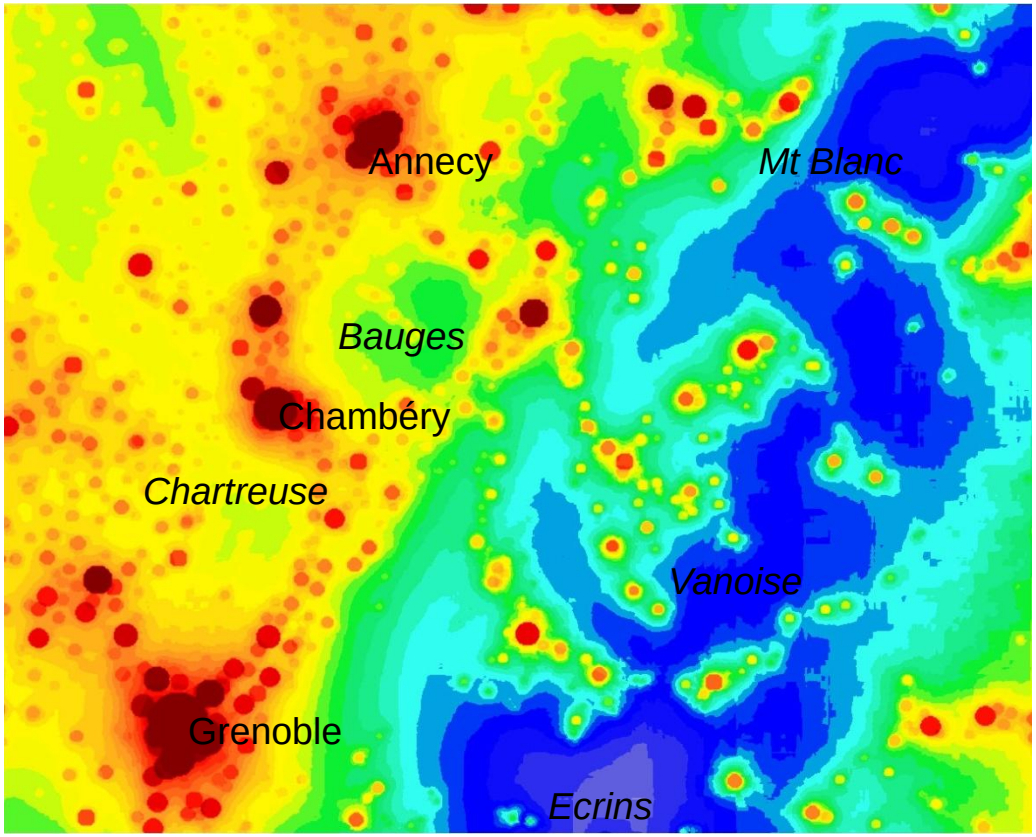
ULOR= 3% ⇒ 600 % de pollution lumineuse en plus par rapport à un lampadaire complètement défilé (ULOR=0) à grande distance de la source (> 100 km)

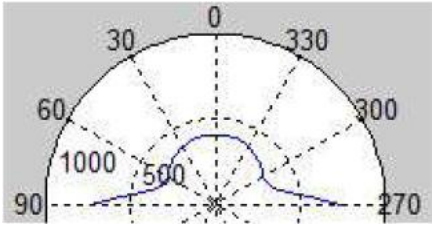
Il faut viser ULOR < 0,06% pour vraiment limiter la pollution lumineuse !!!

i.e. ULOR < 1/100 Flux réfléchi nécessaire !!!

La confirmation par les simulations (1/4)

L'exemple de la pollution lumineuse actuelle sur le département de la Savoie pour une hauteur de 45° au dessus de l'horizon





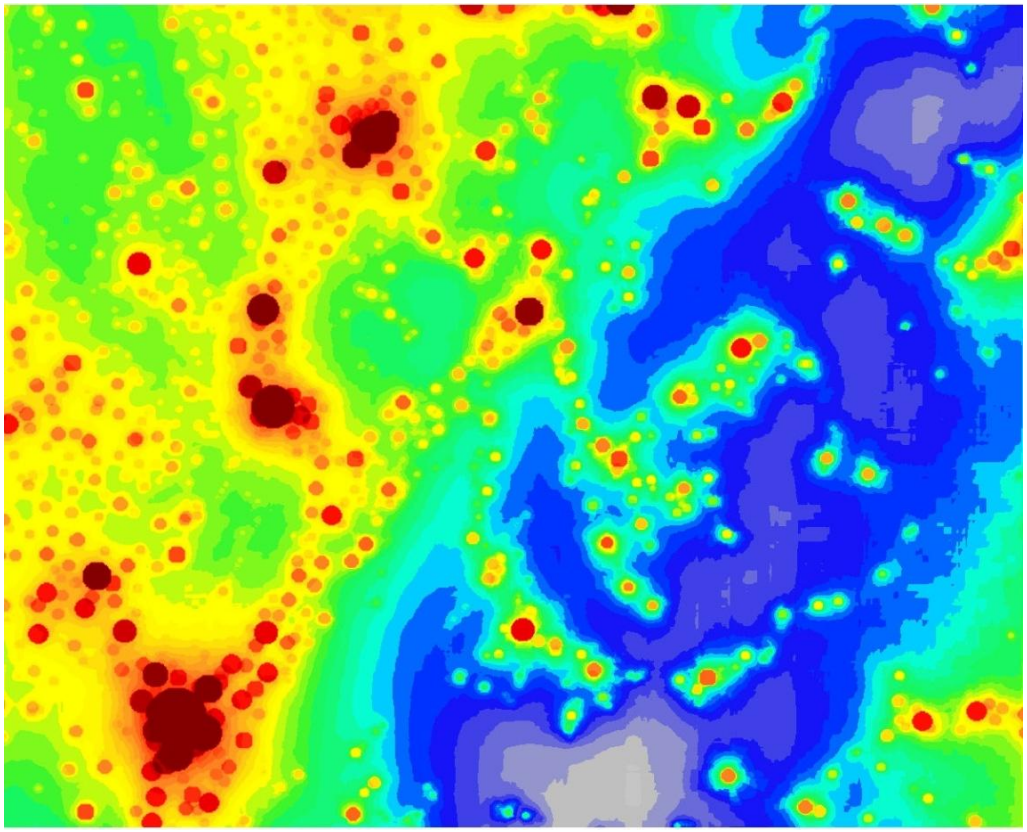
Conditions atmosphérique : Très bonne transparence avec une visibilité horizontale de 50 km au niveau de la mer

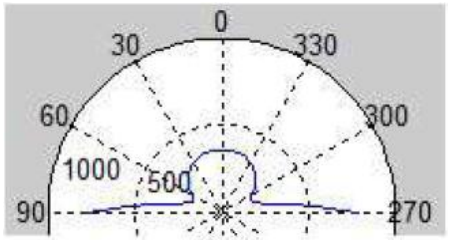
Situation actuelle en France : 0.15 point lumineux par habitant avec P_{moy}=150W

$ULOR_{moy}$ choisi = 14%

La confirmation par les simulations (2/4)

Application généralisée de la prescription de l'AFE avec ULOR=3% pour tous les lampadaires (fonctionnels+décoratifs)





Conditions atmosphérique : Très bonne transparence avec une visibilité horizontale de 50 km

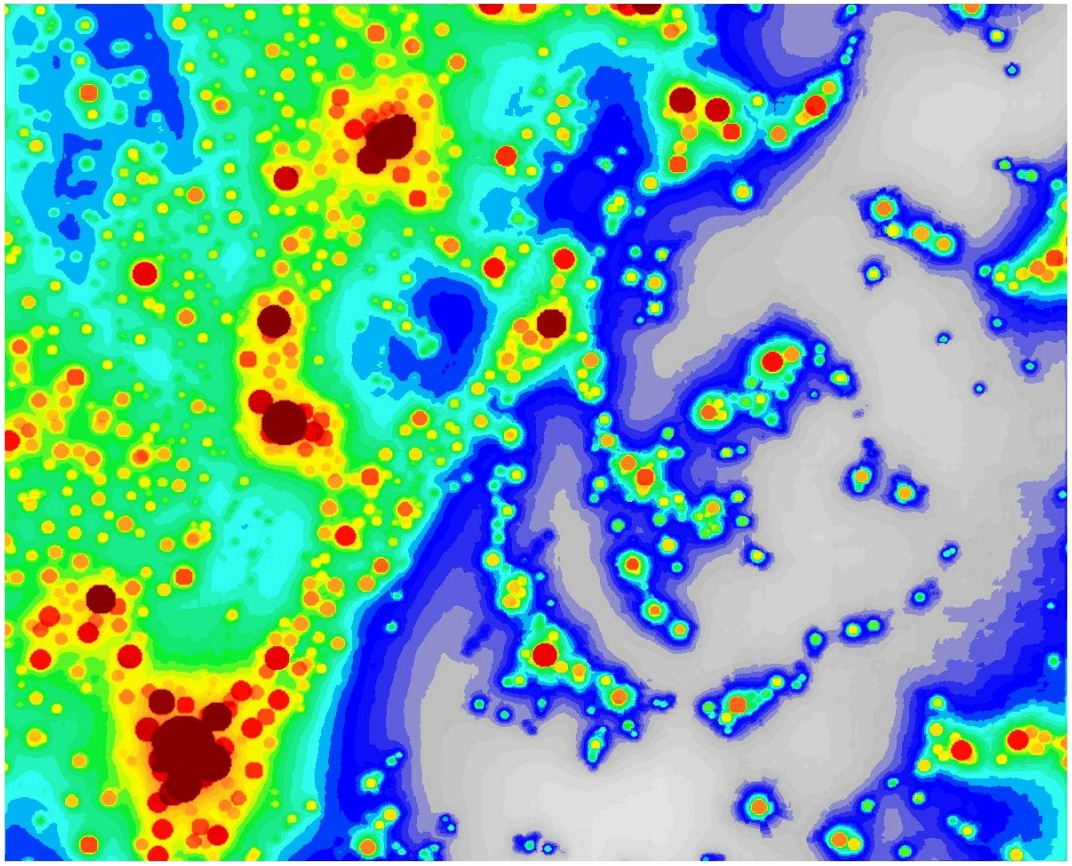
$ULOR_{moy}$ = 3%

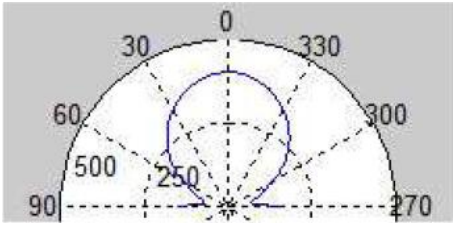
Bien faible amélioration de la situation : Suppression des « boules » insuffisante !

Si $ULOR_{moy,fonct}$ = 2%, il faut $ULOR_{moy,déc}$ = 5% (Cas 65% de luminaires fonctionnels)

La confirmation par les simulations (3/4)

Utilisation généralisée de luminaires complètement défilés





Conditions atmosphérique : Très bonne transparence avec une visibilité horizontale de 50 km

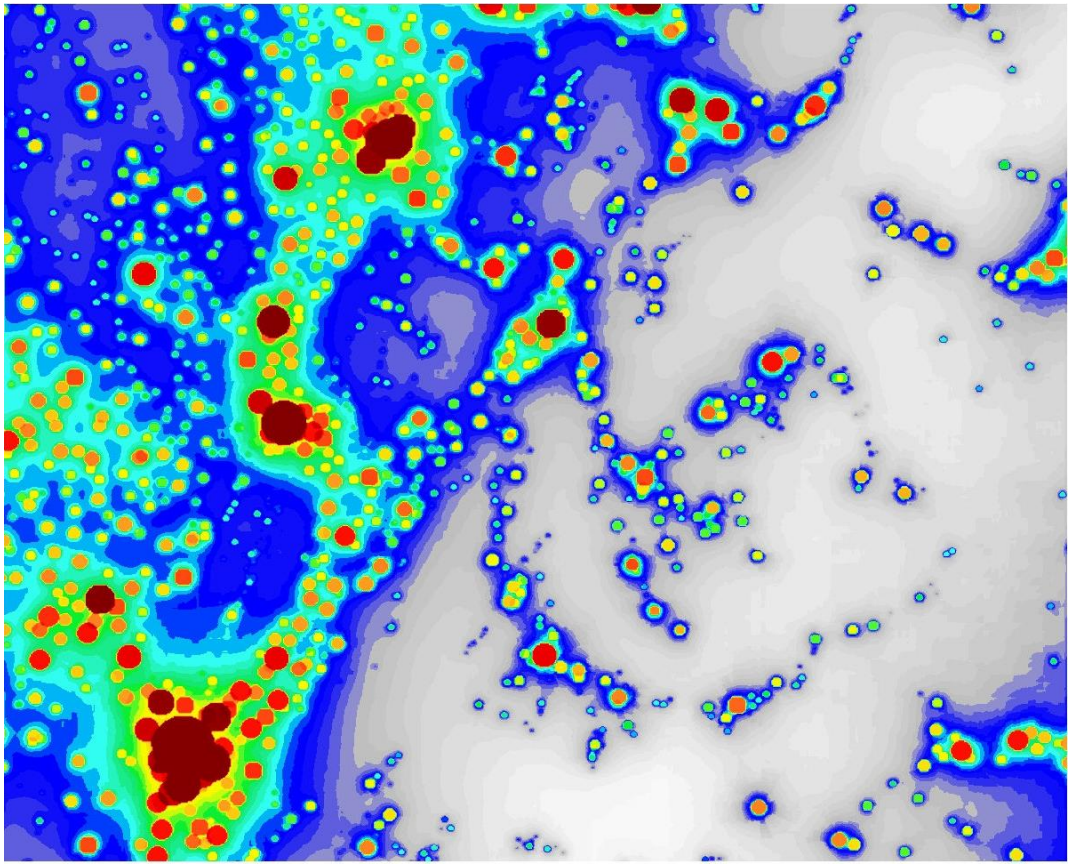
ULOR = 0,1%

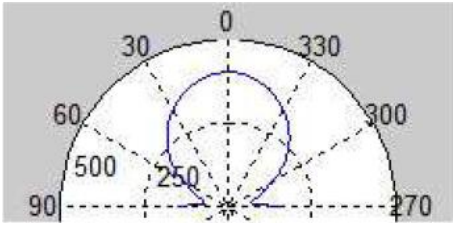
La pollution lumineuse est très localisée autour des centres urbains

Quelques km en dehors, on retrouve des cieux de très bonne qualité

La confirmation par les simulations (4/4)

Effet d’une diminution des puissances d ’éclairage de 150W à 70W





Conditions atmosphérique : Très bonne transparence avec une visibilité horizontale de 50km

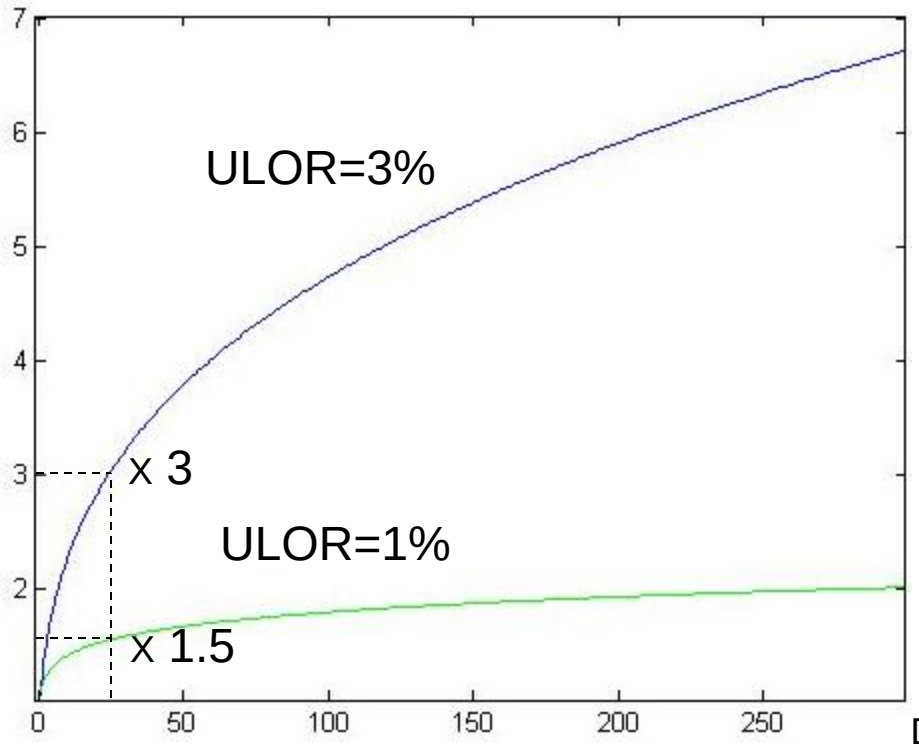
ULOR = 0.1%

Voir CCTP ANPCEN

Une situation idéale et réaliste alliant protection de l’environnement nocturne et éclairage public optimale avec des niveaux d’éclairements au « juste » niveau

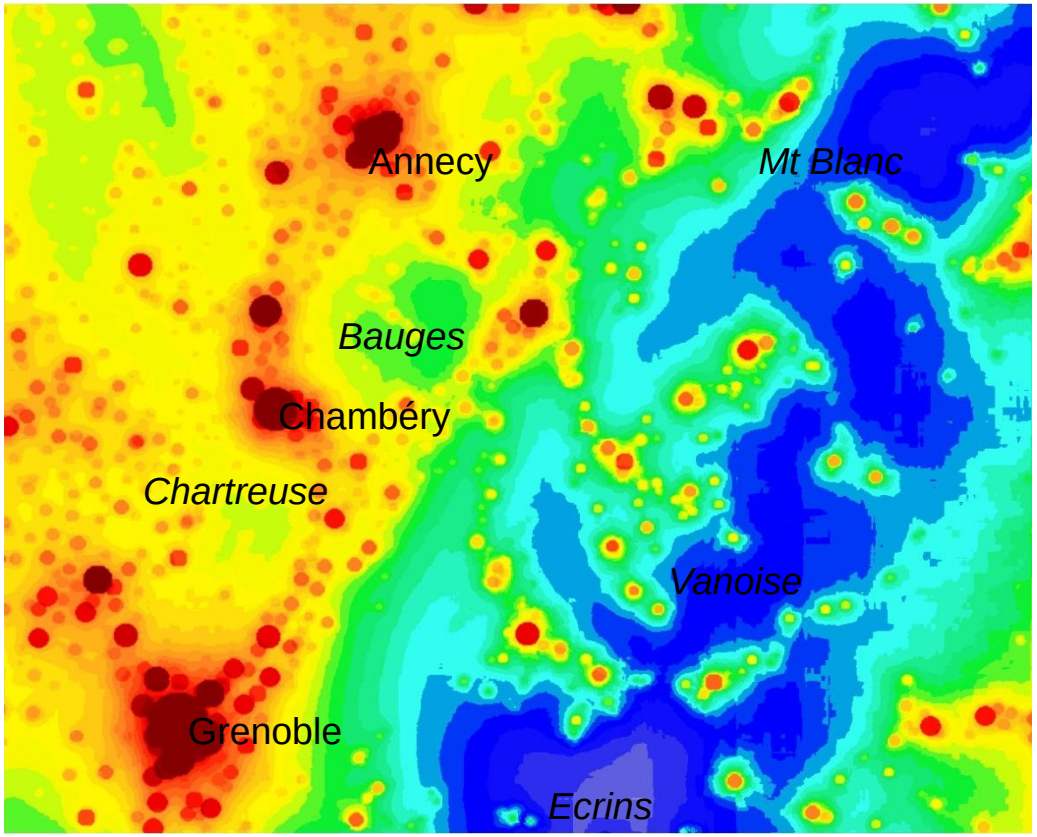
ULOR et augmentation de la pollution lumineuse

Augmentation de la PL à 45° par rapport au cas FCO



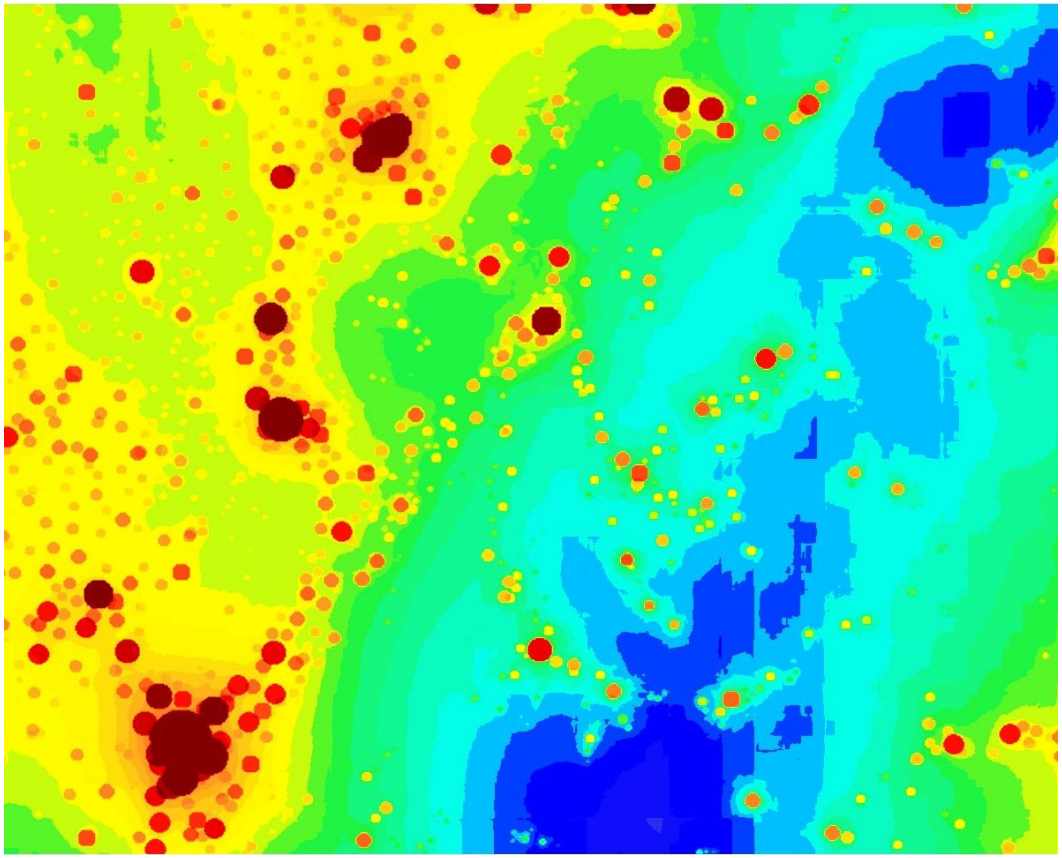
Les effets des conditions météorologiques

Cas de référence : Très bonne transparence (Visibilité V~ 50km)



Les effets des conditions météorologiques

Atmosphère parfaite sans aérosols (Visibilité V>100km)

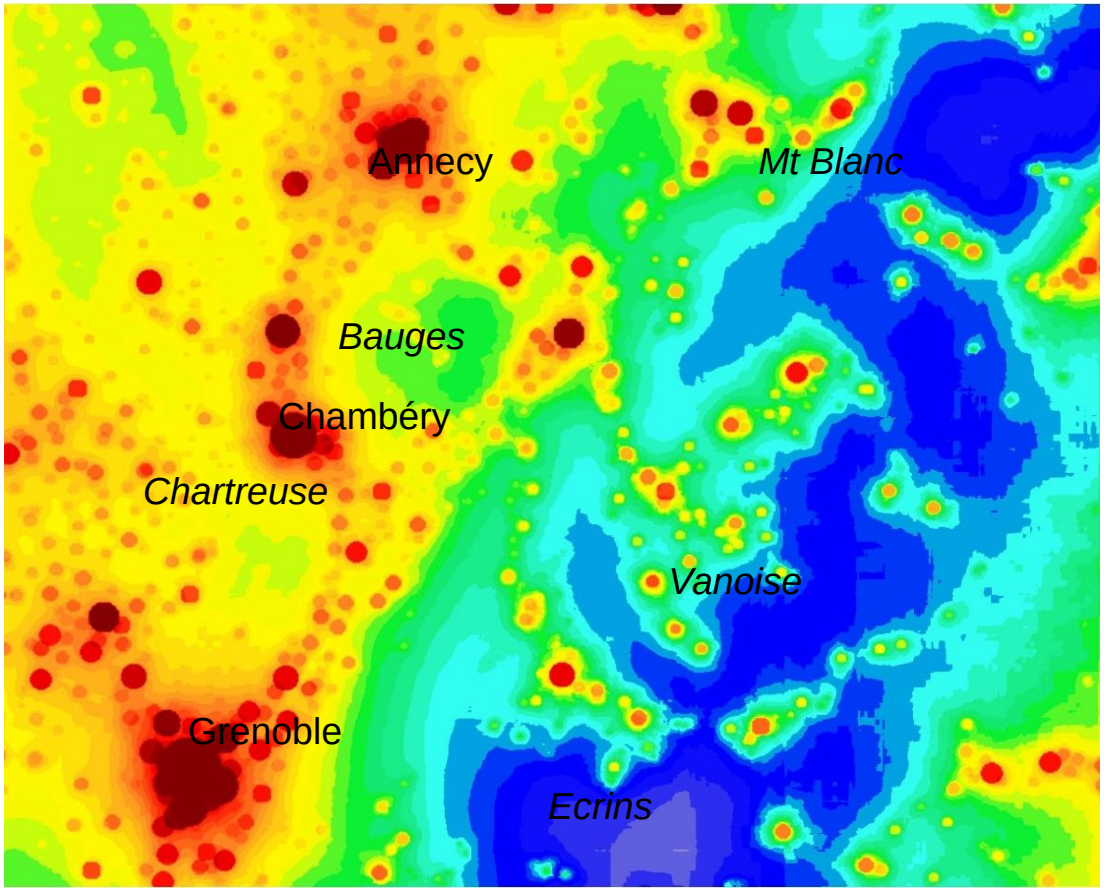


Même avec une atmosphère parfaite, la pollution lumineuse est toujours très présente et aucun endroit même très isolé est épargné !!!

~~Nuisances lumineuses~~ → Pollution lumineuse

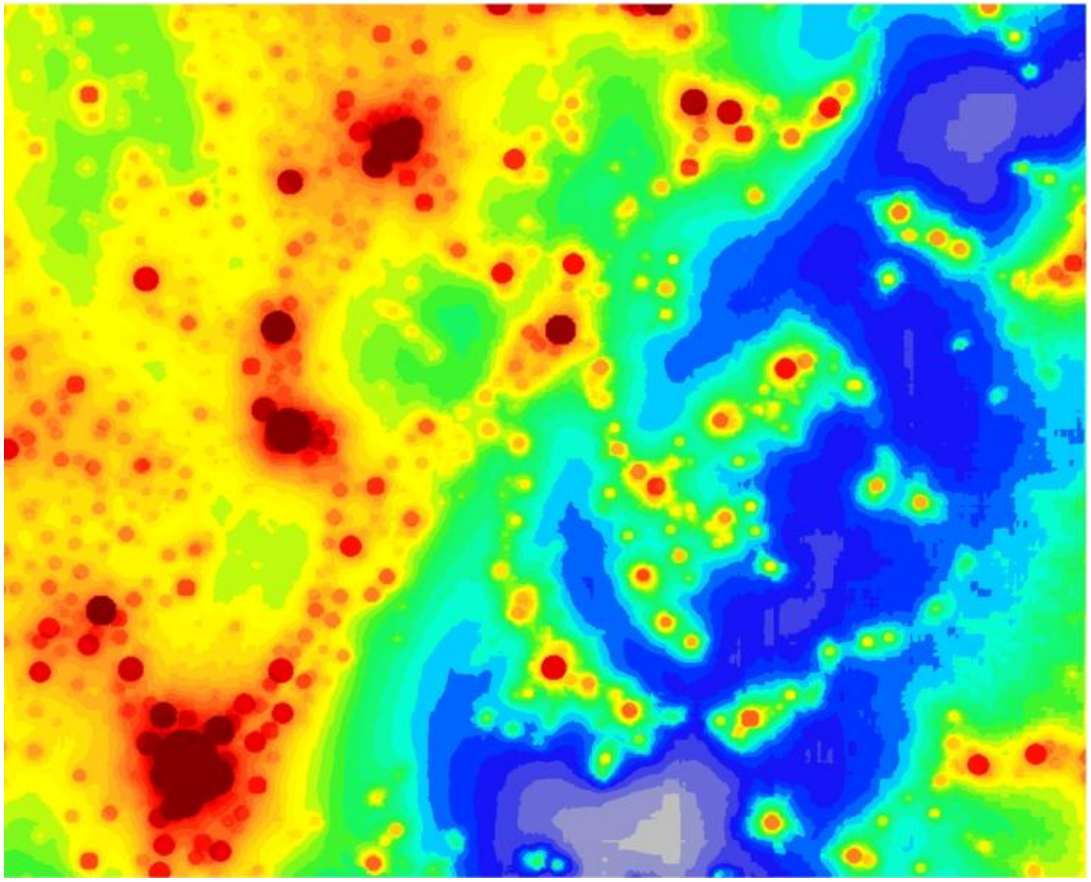
Les effets des conditions météorologiques

Cas de référence : Très bonne transparence (Visibilité V~ 50km)



Les effets des conditions météorologiques

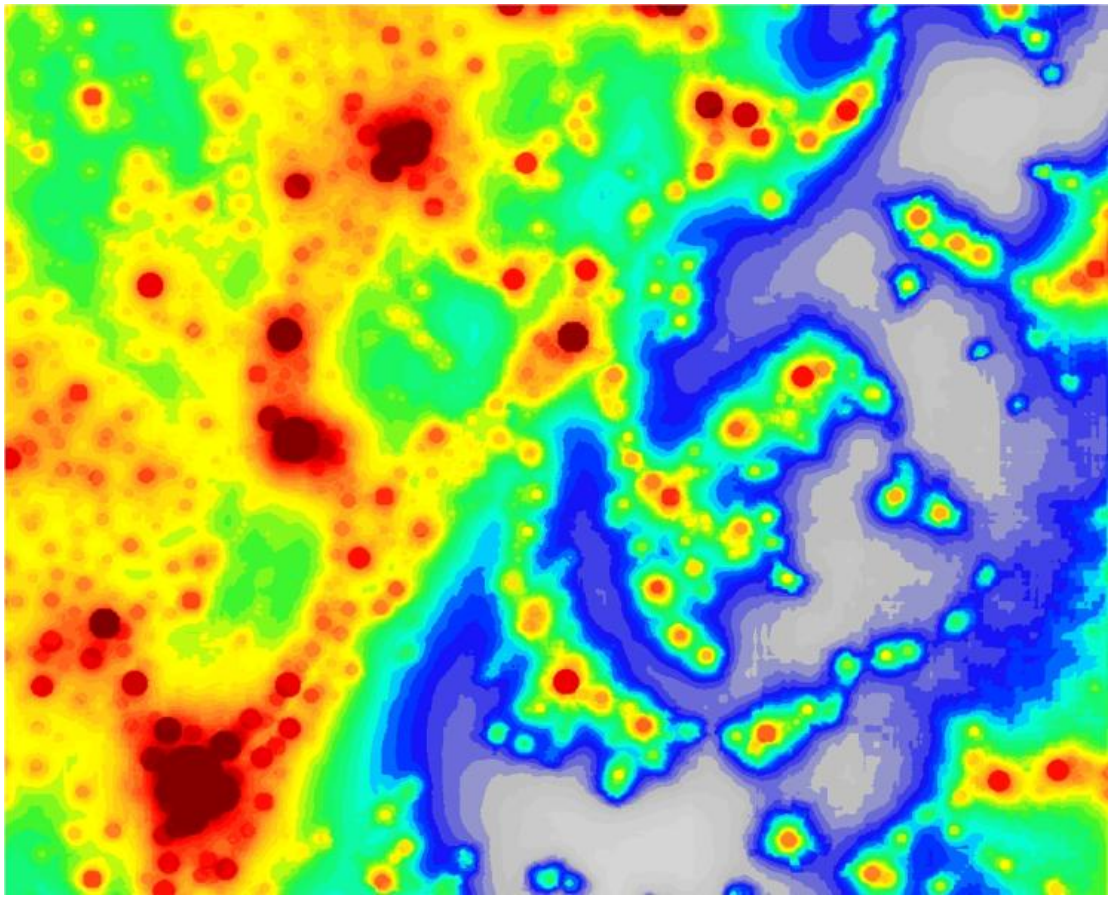
Atmosphère de transparence moyenne (Visibilité V~ 26 km)



Diffusion plus importante par les aérosols à proximité des sources

Les effets des conditions météorologiques

Atmosphère de transparence médiocre (Visibilité V~ 14 km)



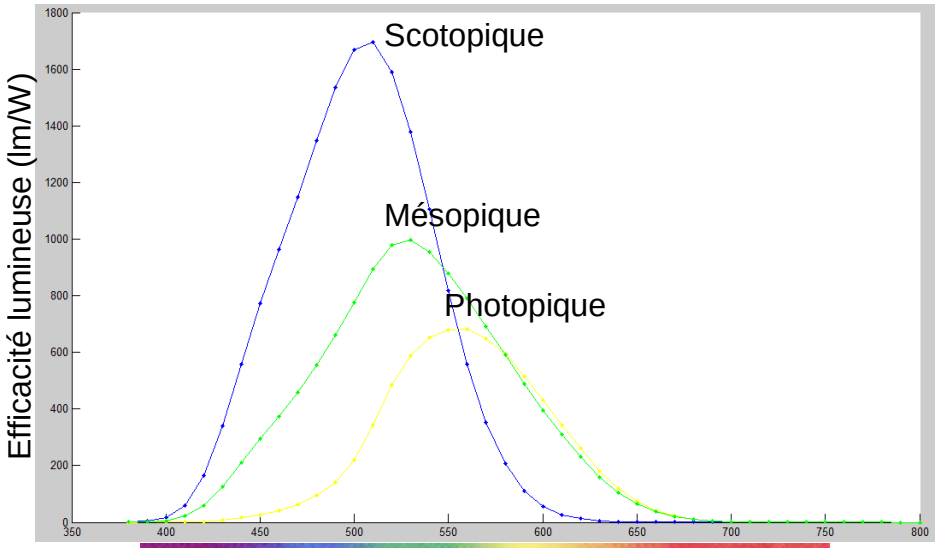
Pollution atmosphérique n'aggravant la pollution lumineuse que localement (< 15 km)

Diminution même de la pollution lumineuse à grande distance par l'absorption

Reste à intégrer l'effet des nuages d'altitude ou du brouillard sur la pollution lumineuse …

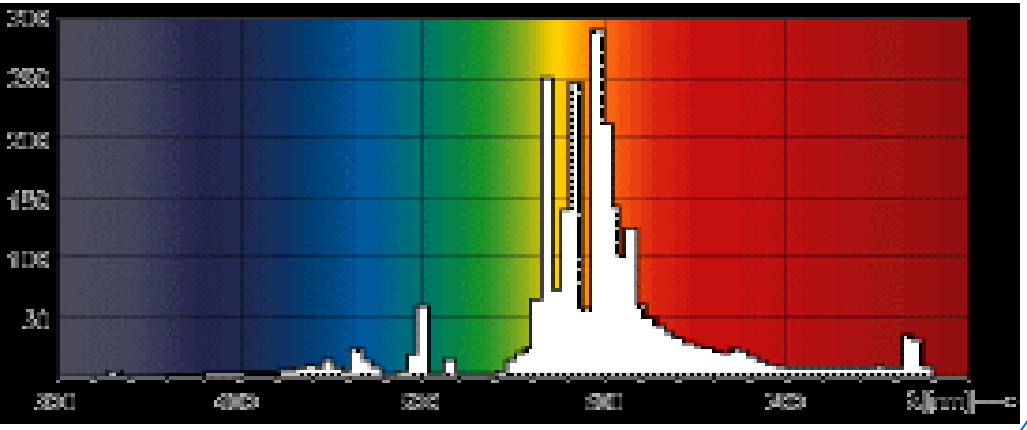
L’impact du spectre des lampes sur l’environnement nocturne

Courbe de sensibilité de l’œil humain



X

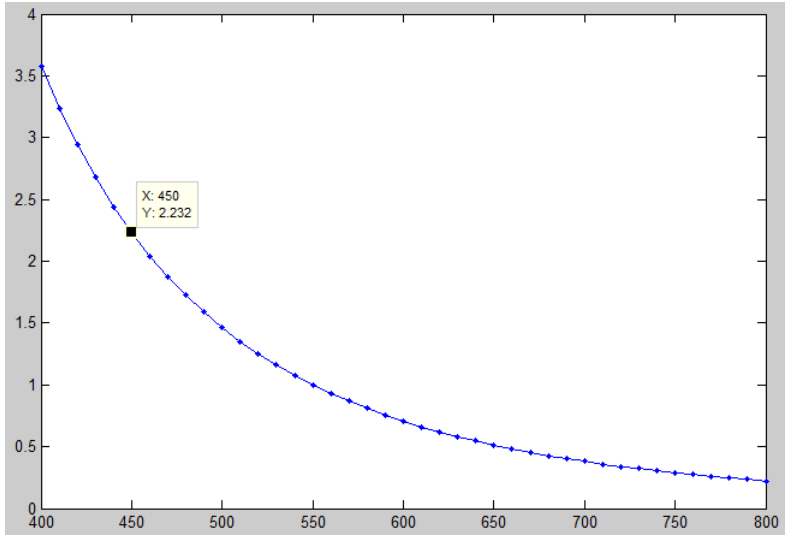
Spectre de la lampe considérée



Σ = Flux lumineux de la lampe pour la luminance considérée en lm

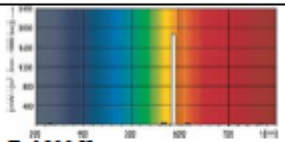
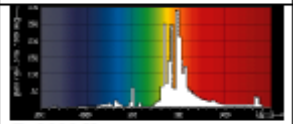
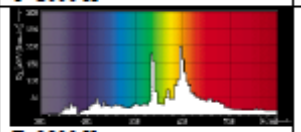
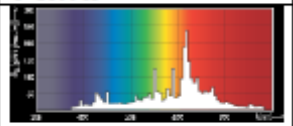
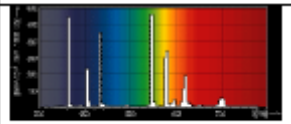
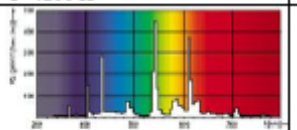
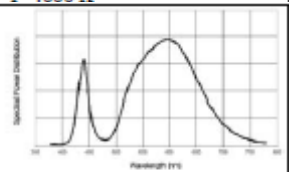
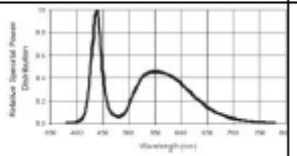
X

Coefficient de diffusion de la lumière normalisé à 550 nm



Σ = Impact de la lampe sur le milieu dû à la diffusion de la lumière intégrée sur tout le spectre

L'impact du spectre des lampes

Type de lampe considérée	Spectre et température de couleur associée	Rendement lumineux (en lm/W) dans les différentes bandes de sensibilité de l'œil humain: Photopique (L > 3 cd/m²)	Mésopique* (L = 0,5 cd/m²)	Scotopique (L < 0,001 cd/m²)	Facteur d'amplification de la diffusion Rayleigh par rapport à une lampe au Sodium Haute Pression dans la bande scotopique	Economie d'énergie possible en utilisant la lumière blanche par rapport au Sodium Haute Pression pour une luminance de 0,5 cd/m² (en %)	Impact minimal sur l'environnement nocturne
Sodium Basse Pression (Philips SOX 90W)	 T=1800 K	152	146	33	0,41	37,7	0,26
Sodium Haute Pression (Philips SON-T 70W)	 T=2000 K	95	106	64	1	0	1
Iodures métalliques à brûleur céramique 1 MASTER CityWhite CDO-TT 70W	 T=2800 K	86	116	86	1,92	9,4	1,75
Iodures métalliques à brûleur céramique 2 MASTER CosmoWhite CPO-TW 90W	 T=2880 K	112	148	144	2,49	39,6	1,79
Vapeur de Mercure Haute Pression Philips HPL 4 80W	 T=4200 K	50	61	50	0,87 (en fait 1,51) pour obtenir le même flux lumineux qu'avec une SHP !	-76.6	1,51
Induction PhilipsMASTER QL 85W	 T=4000 K	82	114	121	2,05	7,6	1,91
LED Luxeon K2 blanc chaud	 T=3000 K	62	82	80	1,29 (en fait 1.67) pour obtenir le même flux lumineux qu'avec une SHP !	-29	1,67
LED Luxeon K2 blanc froid	 T=5500 K	84	129	160	2,91	21,7	2.40

le meilleur pour l'environnement !!

Impact de la lumière blanche jusqu'à 2,4 X plus forte que la lumière de la SHP

et 10 X plus que la SBP !!!

Calibration des cartes en magnitude de fond de ciel avec le sqm

2 types de sqm suivant le cône de mesure sur le ciel

Bande spectrale du sqm très large intermédiaire entre la bande V et B

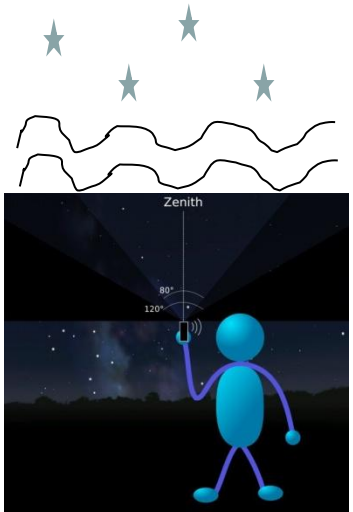
mag sqm ~ mag V +0.15
(Cinzano 2005)

Sqm avec un cône de mesure de ~90°

Mesure au zénith uniquement

Sqm-L avec un cône de mesure de ~25°

Mesure possible et fiable en milieu urbain et jusqu'à 15° de l'horizon en absence de sources ou d'obstruction dans le champ de vision.



étoiles brillantes, Vénus, voie lactée ⇒ Plus grande brillance du ciel

nébulosités, aérosols ⇒ Assombrissement du ciel en milieu désertique OU brillance accrue par la pollution lumineuse

Mesure sqm
=
Brillance intrinsèque fond de ciel (mag / arcsec^2)
+
Effet transparence ciel

Calibration des cartes en magnitude de fond de ciel avec le sqm

Méthode de mesure pour retrouver la valeur intrinsèque de magnitude de fond de ciel

Etude à long terme sur chaque site en effectuant des mesures en absence de lune dans le ciel ET en absence de voie lactée dans le champ de vision du sqm (utilité du sqm-L)

Bien noter l'heure de la mesure et la direction de visée, ainsi que les conditions atmosphériques (pression, T°C, humidité, visibilité, présence de cirrus) avec encore mieux l'estimation de l'extinction atmosphérique par la mlvZ et la mlvUmi ou en mesurant le plus proche de la séance d'observation la brillance de la lune (avec le sqm) ou du soleil (avec un luxmètre avec un calibre à 100000lux) à une hauteur donnée.

Pensez à reporter le maximum de ces informations sur le site http://www.cieldenuit.fr/base_sqm.html maintenu par Carine Souplet

Valeurs Sky Quality Meter pour la France

Date	Observateur	Nom du lieu	Dépt	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Valeur SQM	Intervalle +/-	mlvonUMi	mvlonZ	Commentaires
05/03/08	Y.LHOUMEAU	FEILLENS	01	180	46.33	4.9 E	20.30	0,05	-	-	Vent, humidité faible.
31/03/08	Y.LHOUMEAU	FEILLENS	01	180	46.33	4.9 E	20.50	0,02	-	-	Temp. : 5°C / Humidité faible, ciel magnifique avant perturbation nuageuse prévue le lendemain.
10/02/08	C.SOUPLET	LANDIFAY	02	110	49.81	3.61 E	21.15	0,03	6.17	-	Temp. : 0°C
07/05/08	C.SOUPLET	LANDIFAY	02	110	49.81	3.61 E	21.30	0,05	-	-	Temp. : 10°C, pas d'humidité, pas de Voie lactée.
28/01/09	M.SENEGAS	LANDIFAY	02	110	49.81	3.61 E	21.35	0,03	-	-	Temp. : -3°C. Pas de Lune, pas de Voie lactée.
-	B.LAVILLE	LE PETIT TELLE	04	680	43.89	6.08 E	21.72	-	-	-	-
02//02/08	L.FERRERO	LE PETIT TELLE	04	680	43.89	6.08 E	21.31	0.01	-	-	Passage de nuages.
06/04/08	B.LAVILLE	LE PETIT TELLE	04	680	43.89	6.08 E	21.76	0.01	-	-	Mesuree à 1h30 TU. Moyenne de 10 mesures SQM. SQM -L : 21.74 +/- 0.01 (10 mesures). Temp. : 7.9°C, humidité 39%, vent 0-1 Nord.

Calibration des cartes en magnitude de fond de ciel avec le sqm

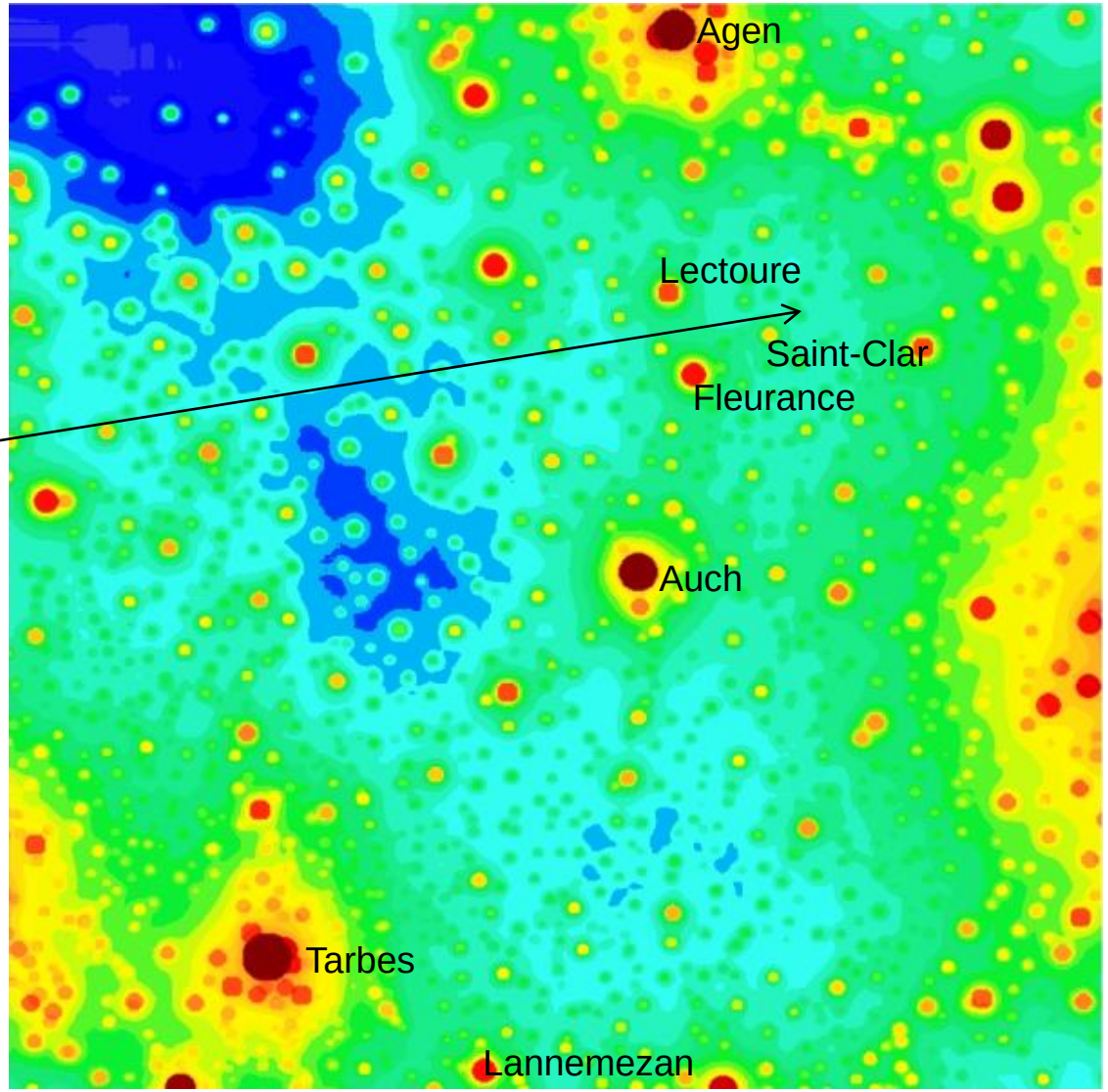
Vision globale de l'impact de la pollution lumineuse sur un territoire étendu avec Thotpro pour le zénith : Exemple du Gers

log q	mag sqm /arcsec^2
2.00	17.20
1.75	17.76
1.50	18.37
1.25	18.97
1.00	19.55
0.75	20.10
	20.36
0.50	20.60
0.25	21.04
0.00	21.40
-0.25	21.66
-0.50	21.85
-0.75	21.97
-1.00	22.05

La ferme des étoiles

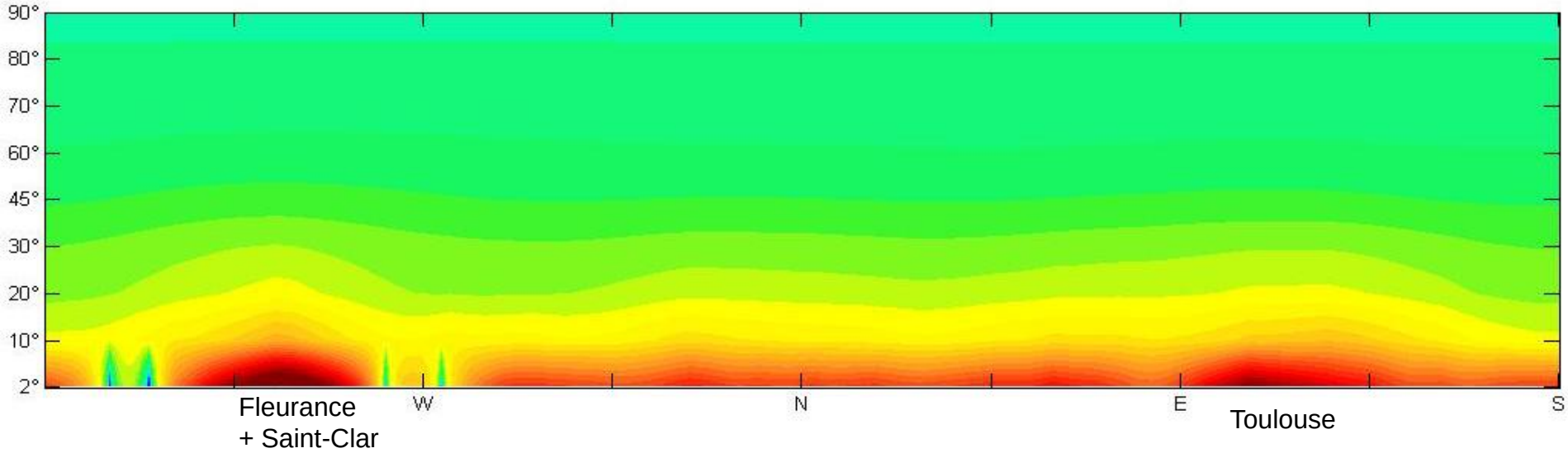
Prévision :
q=0.86

mag_sqm = 21.16
mag_sqml = 21.34



Calibration des cartes en magnitude de fond de ciel avec le sqm

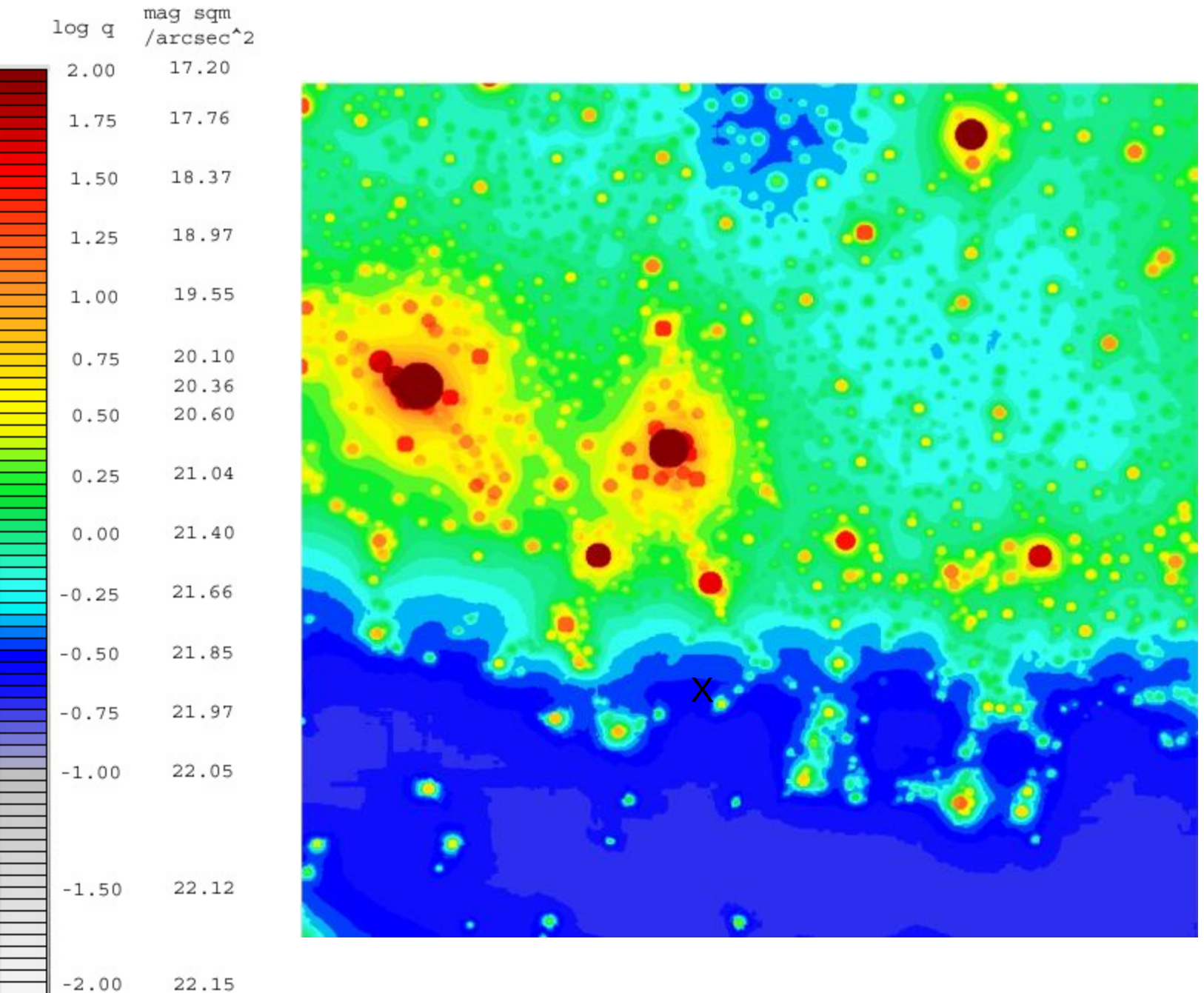
Panorama 360° de la pollution lumineuse pour un site donné avec Thot :
L'exemple de la ferme des étoiles



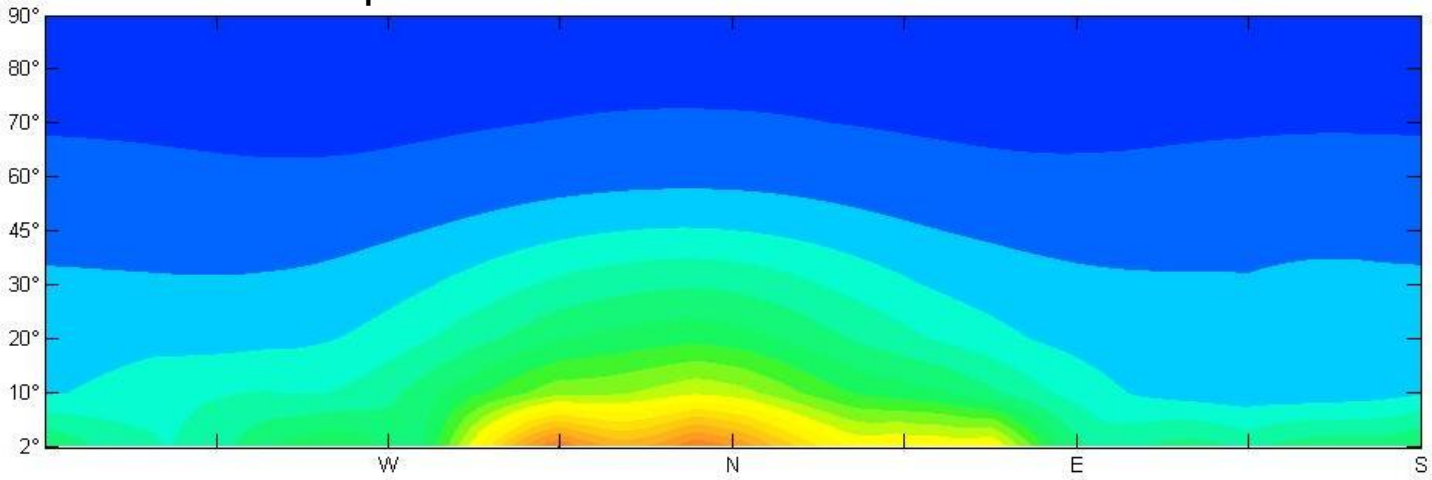
Impact par ordre décroissant des villes sur le ciel du site étudié à 45° :

TOULOUSE	7,66 %	Distance du site= 61.9 km
MAUROUX	5,63 %	1.0 km
SAINT-CLAR	5,44 %	5.1 km
FLEURANCE	4,64 %	14.9 km
AGEN	3,39 %	35.8 km
BEAUMONT DE LOM	3,25 %	14.0 km
SAINT_CREAC	2,84 %	1,6 km
CASTELSARRASIN	2,73 %	26,6 km
MONTAUBAN	2,60 %	44,6 km
AUCH	2,16 %	35,8 km
LECTOURE	2,08 %	16.1 km

Un autre exemple avec le Pic du Midi

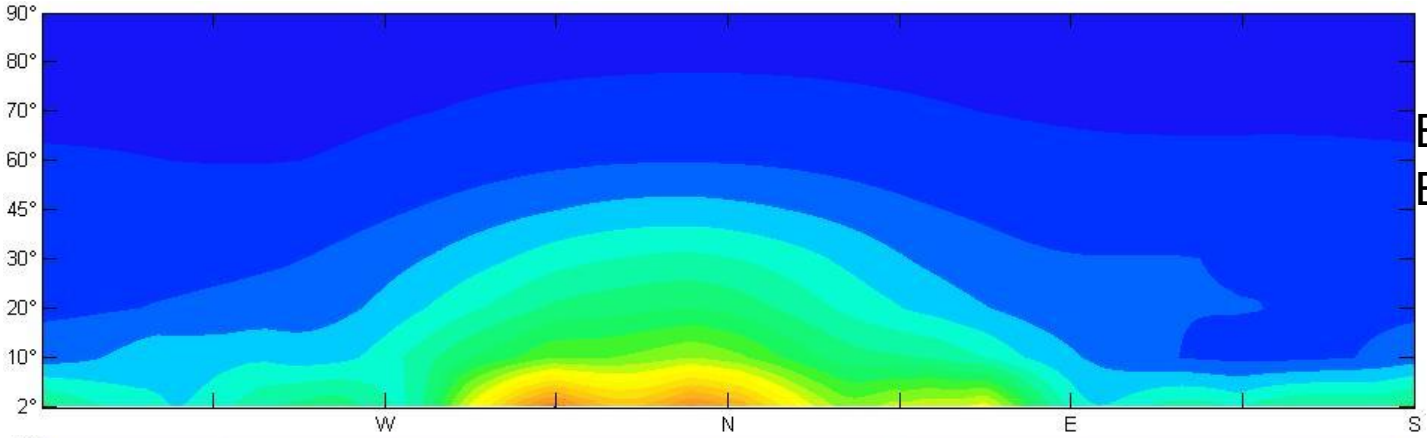


Un autre exemple avec le Pic du Midi



Situation actuelle
ULOR=14%

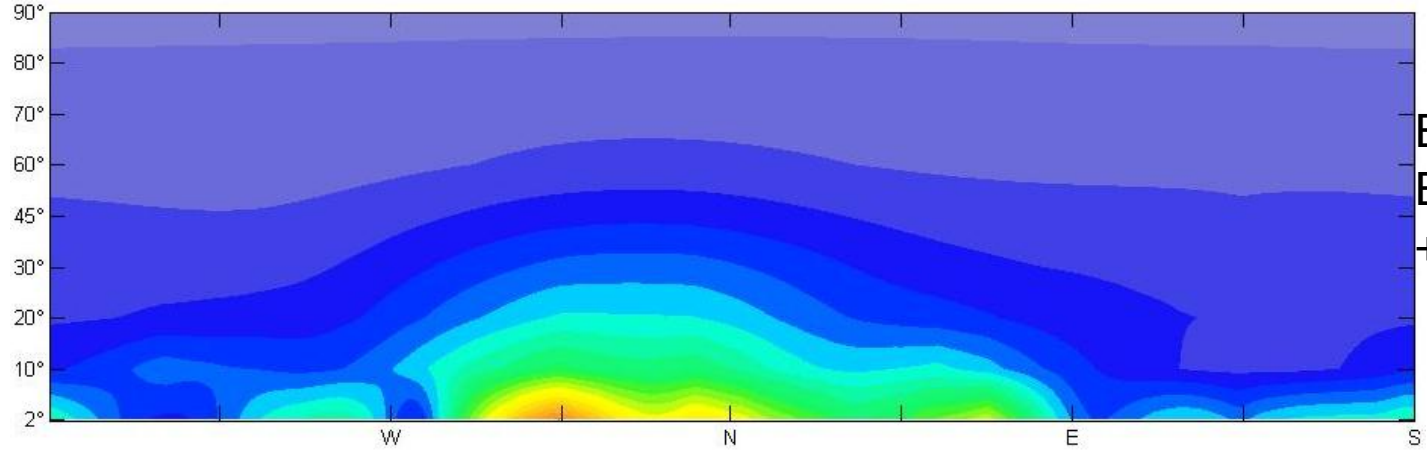
mag_sqm = 21.74
mag_sqml = 21.80



Simulation RICE n°1

E1 : 15km ULOR=0.1%
E2 : 30km ULOR=1%

mag_sqm = 21.87
mag_sqml = 21.92



Simulation RICE n°2

E1 : 15km ULOR=0.1%
E2 : 35km ULOR=1%
+ réduction puissance
de 150W à 70W

mag_sqm = 21.95
mag_sqml = 21.98

Les limites du concept de réserve et l'utilité d'une réglementation générale à l'échelle de la France (via le Grenelle2 et la norme AFNOR ?)

Liste des villes en dehors des zones réglementés avec leur contribution respective à 45° et la distance du site :

'PAU' 'Impact=' [0.15] 'Distance du site=' [58.1595]
'TOULOUSE' 'Impact=' [0.06] 'Distance du site=' [129.1827]
'Zaragoza' 'Impact=' [0.04] 'Distance du site=' [165.3498]
'SAINT_GAUDENS' 'Impact=' [0.0275] 'Distance du site=' [51.1180]

Contribution totale des villes en dehors des zones réglementés : **encore 58.8% !!!**

Conclusions et perspectives (1/2)

Intégration d'un modèle de propagation de la lumière complet avec effets d'altitude et de masquage par les montagnes inclus à haute résolution spatiale (150 m)

Confirmation de l'importance de l'utilisation de luminaires complètement défilés ($ULOR_{inst}$ < 0.1%) pour le contrôle de la pollution lumineuse à grande échelle

Impact 10X plus grand de la lumière blanche par rapport à du SBP et 2.4X par rapport à du SHP

Calibration des cartes en échelle sqm rendant l'évaluation systématique et sur le long terme des sites astronomiques accessibles aux amateurs

Etude d'impact possible de la règlementation de l'éclairage public pour une zone délimitée comme pour la future réserve du Pic

Définitions des corridors biologiques de nuit possible pour la circulation de la faune nocturne dans la continuité de la trame verte et bleue du Grenelle 2.

Conclusions et perspectives (2/2)

Actualisation prochaine de la carte de France de la pollution lumineuse présentée sur le site de l'ANPCEN avec le modèle complet calibré comme présenté ici pour les cartes de Savoie et du Gers.

Affinage des cartes localement à partir des données fournies par les communes via le concours villes et villages étoilés ou via les syndicats d'éclairage ?

Visualisation 3D des cartes avec l'aide de Véga Technologie

Pour plus d'informations : http://www.astrosurf.com/licorness/

Diminuer les halos lumineux pour protéger le ciel et l'environnement
A. Le Gue & N. Bessolaz

Vers un contrôle efficace de la pollution lumineuse
N. Bessolaz

Merci de votre attention !