Les Cahiers Clairaut

Été 2022

Éditorial

Dans l'actualité du trimestre vous découvrirez l'image du trou noir Sagittarius A* situé au centre de la Galaxie, image révélée le 12 mai (mais ce n'est pas tout à fait le trou noir que l'on voit).
Vous saurez également comment un petit microphone mis presque par hasard sur Perseverance permet de faire des découvertes dans un domaine qui n'était pas prévu. C'est aussi cela la science.

Le dossier est consacré à un sujet important, la pollution lumineuse. Les conséquences environnementales, écologiques et économiques sont largement développées. Vous aurez assez d'arguments pour convaincre vos élus de limiter l'éclairage nocturne. L'ANCPEN fait le bilan de ce qui existe sur le plan légal, des associations et des chercheurs décrivent ce qui peut se faire pour sensibiliser le public et les collectivités. Le CLEA propose des activités, en particulier par l'observation : dans des lieux plus ou moins sombres, quelles sont les étoiles les moins lumineuses observables à différentes saisons ? N'oubliez pas le jour de la nuit au mois d'octobre.

Vous découvrirez également une maquette autonome pour expliquer les saisons et l'actualité du ciel de l'été pointera la « super » Lune de juillet et l'occultation d'Uranus par la Lune.

Enfin terminons par un article de presse : « une galaxie très lointaine a été découverte. Elle est située si loin que la lumière que nous percevons aujourd'hui l'a quittée lorsque l'Univers avait moins de 10 % de son âge actuel, et elle a donc voyagé pendant 13 milliards d'années ». Mais qu'y a-t-il de vrai dans tout cela ? Lisez l'article sur distances et vitesses dans L'Univers.

Bon été à toutes et tous.

pour l'équipe de rédaction
Jean Ripert

Sommaire

Actualités
Brèves d'observatoires et autres nouvelles
Frédéric Pitout p 2

Maquette
Saisons, hauteur du Soleil et programmation d'un Arduino
Hervé Faivre, Pierre Causeret p 6

Dossier : pollution p 10

Avec nos élèves
Laissez les étoiles nous éblouir
Olivier Gayrard p 11

Événement
La nuit est belle !
Isabelle Vauglin p 16

Vie associative
Le groupe CLEA « Ciel Étoilé »
Sylvie Thiault p 20

Article de fond
Plaidoyer national pour l'entrée de la pollution lumineuse dans les textes de référence
ANPCEN p 22

Article de fond
DarkSkyLab, les chasseurs de pollution lumineuse
Sébastien Vauclair & al. p 24

Article de fond
Observatoire de l'environnement nocturne
Samuel Challéat & al. p 27

Unités et Mots croisés
Olivier Gayrard, Pierre Causeret p 34

Observation
Le ciel de l'été
Pierre Causeret p 35

Article de fond
Temps et distances dans l'Univers
Patrice Bouchet, Béatrice Sandré p 38

Lecture pour la marquise
Soleil – Mythes, histoire et sociétés
Frédéric Pitout p 47

Solution des mots croisés p 47

Observation
L'éclipse totale de Lune du 16 mai au matin p 48

BRÈVES D'OBSERVATOIRES ET AUTRES NOUVELLES

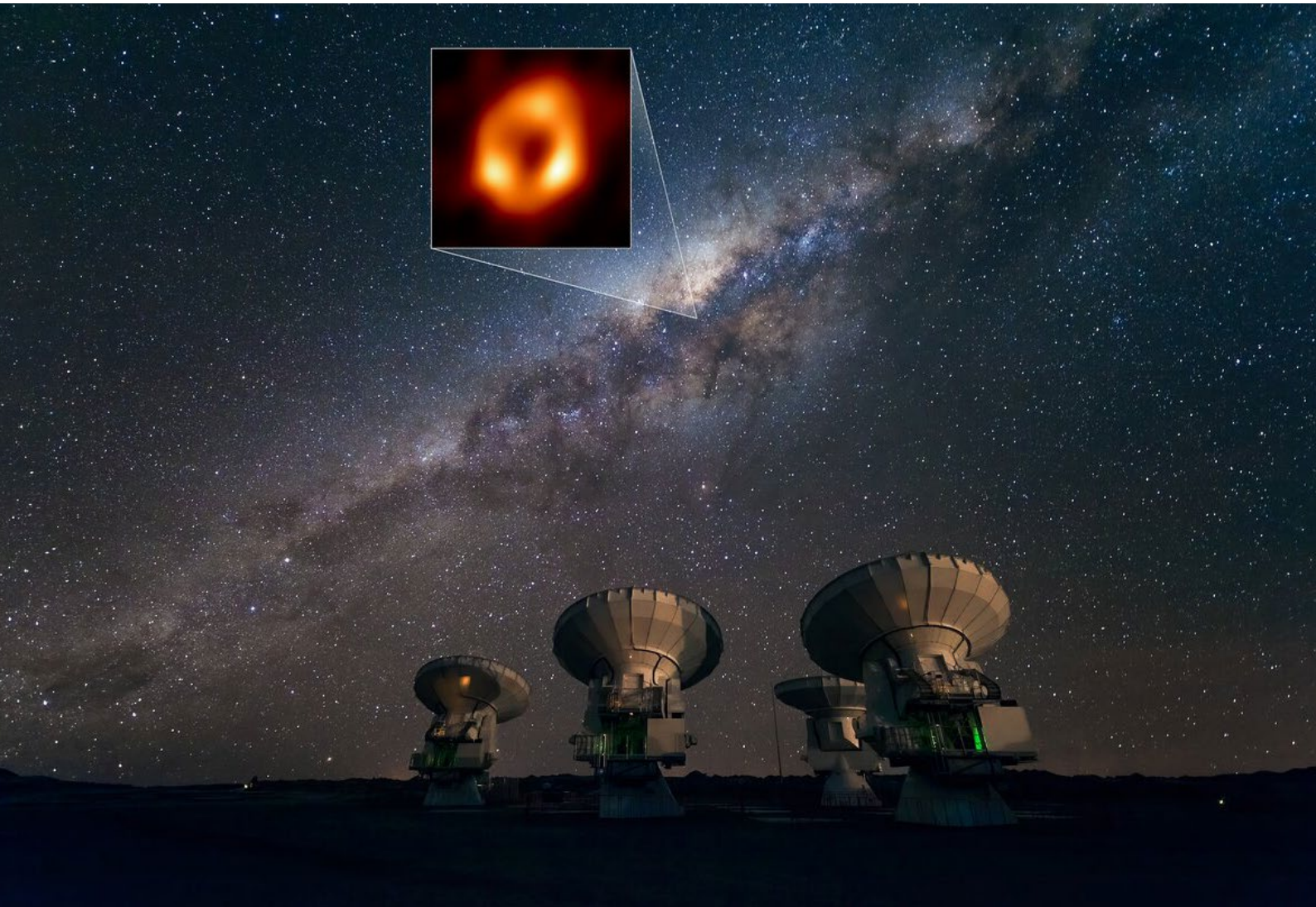
Frédéric Pitout, IRAP Toulouse

La première image du trou noir au centre de la Voie lactée

Après l'image de M87* en 2021, la collaboration internationale *Event Horizon Telescope* (EHT) a encore produit l'image d'un trou noir mais pas n'importe lequel. Il s'agit cette fois-ci de Sgr A*, le trou noir supermassif logé au centre de notre Galaxie. Pour cela, ce sont des milliers d'images acquises par un réseau de radiotélescopes situés un peu partout sur Terre qui ont été utilisées, faisant ainsi de notre planète un immense radiotélescope virtuel. Les astronomes avaient déjà des indices de la présence d'une masse colossale dans la constellation du Sagittaire en observant l'orbite d'étoiles environnantes (voir CC177). Mais là, c'est une image du trou noir lui-même qui a été obtenue, ou plus exactement du rayonnement radio émis par son disque d'accrétion (le gaz et la poussière qui gravitent autour du trou noir). La comparaison des deux trous noirs visualisés s'annonce palpitante. En effet, Sgr A* est mille fois moins massif que M87*. Les spécialistes disposent donc d'images de deux trous noirs sensiblement différents, au centre de deux galaxies très différentes aussi. Ils vont pouvoir étudier, entre autres choses, le rôle des trous noirs supermassifs dans la formation et l'évolution des galaxies.

https://www.eso.org/public/france/news/eso2208-eht-mw/

Image 1. **Photo d'antennes du réseau de radiotélescopes Alma avec, en incrustation, l'image de Sgr A* (Eso/José Francisco Salgado, collaboration EHT).**



Mars : Perseverance monte le son !

Installer un microphone, même très léger (13 g), sur l'astromobile martien *Perseverance*, pour quoi faire ? Ce n'était au départ qu'un test – osons le dire : un coup de com'. Pourtant, ce micro s'est avéré utile pour vérifier le fonctionnement des différents instruments du robot. Mais on pouvait certainement en tirer beaucoup plus. Et de fait, des résultats ont été publiés en avril 2022 dans la revue *Nature*. Ils font état de mesure de la vitesse du son dans l'atmosphère martienne. Cette vitesse est plus faible que sur Terre : 240 m/s au lieu de 340. Mais une surprise attendait les chercheurs : les ondes sonores ne se propagent pas à la même vitesse et ne subissent pas la même atténuation selon leur fréquence. Ainsi, les fréquences en dessous de 240 Hz se propagent plus vite (250 m/s) et les aigus (au-dessus de quelques kHz) s'atténuent plus vite. Ceci est dû aux propriétés du CO_2 à basse pression qui constitue l'essentiel de l'atmosphère martienne. Cette étude montre tout l'intérêt d'équiper les futures missions planétaires d'un micro pour étudier les propriétés des atmosphères.

https://www.cnrs.fr/fr/perseverance-recueille-les-premiers-sons-martiens

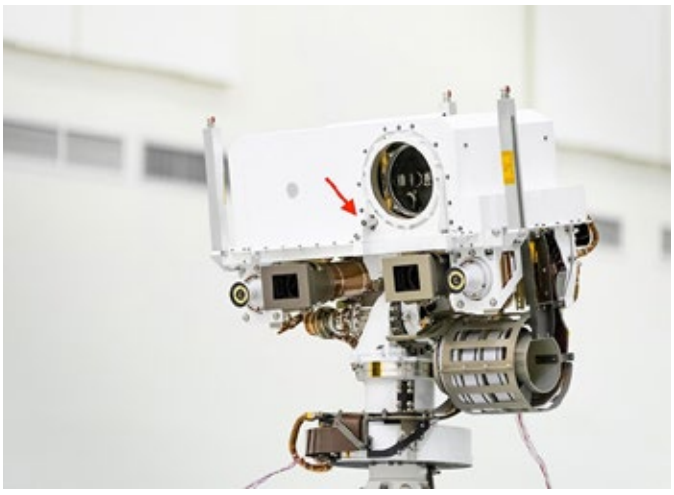


Image.2. **Instrument Supercam installé sur Perseverance. La flèche rouge indique l'emplacement du microphone (Nasa, JPL, CalTech).**

Après les exoplanètes, les exocomètes

Question : quelle est la taille minimale d'un corps détectable par la méthode du transit photométrique lorsqu'il passe devant une étoile autour de laquelle il orbite ? La réponse est quelques kilomètres, soit la taille d'une comète. Et de fait, une trentaine d'exocomètes ont été détectées autour de l'étoile β Pictoris avec le télescope spatial Tess. Et pour chacune d'elles, la taille du noyau cométaire a pu être estimée : ils font entre 3 et 14 km de diamètre. Cette découverte, fruit du travail d'une équipe menée par Alain Lecavelier des Étangs de l'Institut d'astrophysique de Paris, permet d'établir une première distribution de la taille des noyaux de ces exocomètes. Cette distribution a une médiane de l'ordre de 4 km (très semblable à celle du Système solaire) et comporte une grande majorité de petits noyaux cométaires, alors même qu'un biais observationnel favorise la détection des gros objets. Ces observations ont pu aussi confirmer la forme des courbes de transit prédites plus de 20 ans plus tôt par le même auteur !



Image.3. **Vue d'artiste d'exocomètes en orbite autour de l'étoile β Pictoris (Eso/L. Calçada).**

http://www2.iap.fr/users/lecaveli/BetaPic_exocomets/

La Nasa sélectionne deux nouvelles missions pour étudier la couronne et le vent solaires

L'agence spatiale états-unienne a donné son feu vert pour la construction de deux nouvelles missions spatiales qui vont étudier l'environnement de notre étoile.

Muse (*Multi-slit solar explorer*) est un petit télescope qui observera le Soleil dans le domaine de l'extrême ultraviolet. Ces observations permettront d'étudier la zone de transition, région de l'environnement solaire où la température de la couronne augmente très rapidement de quelques dizaines de milliers à plus d'un million de kelvins. Muse va aussi pouvoir surveiller le déclenchement des éruptions solaires. Le lancement est prévu en 2027.

HelioSwarm est une mission multi-satellite constituée d'une sonde mère et de huit sondes filles évoluant en formation. L'objectif est d'effectuer des mesures multipoints de la turbulence du vent solaire. (Rappelons que la turbulence est un processus physique qui, dans un fluide, permet de transférer et dissiper l'énergie cinétique des grandes échelles spatiales vers les plus petites – des grands tourbillons vers des plus petits, pour dire les choses simplement). Pour cela, l'instrumentation comprendra des détecteurs de particules chargées et de champ

magnétique, dont certains construits par des laboratoires français. Le lancement est prévu en 2026.

https://www.nasa.gov/press-release/new-sun-missions-to-help-nasa-better-understand-earth-sun-environment (en anglais)

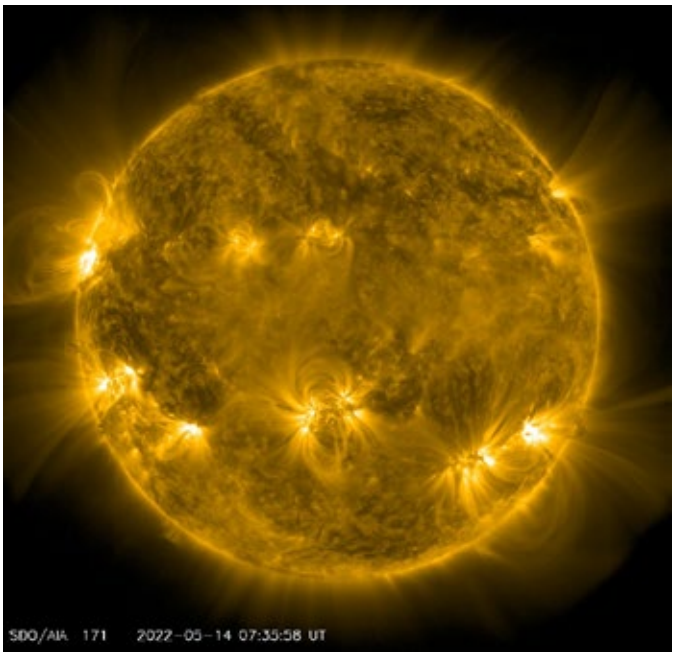


Image.4. **Image du Soleil dans le domaine extrême UV (17,1 nm) prise par le télescope SDO (Nasa).**

Bientôt la fin du télescope infrarouge aéroporté Sofia

Sofia (pour *Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*) est le doux nom d'un télescope infrarouge embarqué dans un Boeing 747 modifié. Fruit d'une collaboration germano-états-unienne, l'instrument de 2,5 m de diamètre qui est en service depuis 2010 profite de l'altitude pour s'ouvrir de nouvelles fenêtres d'observation (plus bas l'atmosphère plus dense, dont la vapeur d'eau, absorbe de nombreuses bandes de fréquence). Sofia a contribué à de nombreux domaines de l'astronomie comme l'observation des régions de formation stellaire et planétaire, l'observation de planètes et de petits corps du Système solaire, l'identification d'oxygène dans l'atmosphère de Mars et d'eau à la surface de la Lune, etc. Pourtant, les retours scientifiques ont été jugés insuffisants au regard des coûts élevés d'exploitation : avant le lancement du télescope spatial James Webb, Sofia était le second plus gros budget de la Nasa après le télescope spatial Hubble. Le programme Sofia devrait être définitivement arrêté en septembre 2022.

https://www.sofia.usra.edu/ (en anglais)
https://lejournal.cnrs.fr/telescope-volant



Image.5. **Boing 747 Sofia avec la trappe du télescope ouverte (Nasa, DLR).**

Perte de 40 satellites Starlink

C'est une nouvelle qui avait presque réjoui les astronomes. Si elle vous avait échappé, voici un petit rappel. Le 3 février 2022, la compagnie SpaceX met en orbite une grappe de 49 satellites Starlink comme elle le fait régulièrement depuis 2019. Cette constellation de satellites (12 000 prévus dans un premier temps, puis jusqu'à 42 000 !), est censée assurer un accès à Internet à haut débit de n'importe quel point de la Terre. Peu après le lancement, les satellites sont placés sur une orbite de transition à 210 km d'altitude avant de rejoindre leur orbite de service à quelque 550 km d'altitude. Tout allait pour le mieux le 3 février quand ce même jour et le suivant, un double orage géomagnétique se produisit suite à une éruption coronale de masse du Soleil, pourtant modeste, dont les effets ont été largement sous-estimés. Parmi ces effets, le chauffage de la haute atmosphère qui a gonflé et augmenté la concentration en atomes et molécules à l'attitude des satellites. Parmi les 49 satellites lancés, 40 ont alors subi un freinage atmosphérique trop important pour pouvoir rejoindre leur altitude finale et ont perdu de l'altitude jusqu'à se consumer dans l'atmosphère au cours des jours suivants.

Groupe de travail « astronomie » à l'Irem de Paris

L'Institut de recherche pour l'enseignement des mathématiques (Irem) de Paris, comme tous les Irem (Ires ou Irem&s comme ils ont parfois été renommés), décline ses activités en plusieurs groupes de travail. Ces groupes de travail développent des ressources pédagogiques et organisent des formations d'enseignants dans un domaine spécifique. C'est un groupe de travail dédié à l'astronomie qui a vu le jour en 2021 et que les Parisiens intéressés peuvent contacter.

https://irem.u-paris.fr/astro

Page Web « Journée de l'astronomie dans les écoles »

Le groupe de travail « Journée de l'astronomie dans les écoles » (*Astronomy day in schools*) fait partie de la commission C1 « Développement et éducation à l'astronomie » de l'Union astronomique internationale. Pour information ou rappel, la journée de l'astronomie dans les écoles, un peu délaissée ces deux dernières années, a vocation à faire pratiquer l'astronomie en classe. Elle est organisée autour d'un équinoxe ou solstice, ou encore lors d'un événement astronomique (la récente éclipse de Lune du 16 mai 2022 par exemple). Un site Web a été mis sur pied, où on trouvera les dates des événements, les activités proposées et les modalités de participation. Plus généralement, on y trouvera aussi des ressources diverses. Tout est en anglais (pour l'instant ?).

http://adis.narit.or.th/

Ouverture du nœud français de l'Office de l'astronomie pour l'éducation

Depuis sa sélection par l'Union astronomique internationale, la Maison de l'astronomie (*Haus der Astronomie*) d'Heidelberg en Allemagne accueille l'Office de l'astronomie pour l'éducation (OAE). Cet office s'appuie sur des coordinateurs nationaux dans les pays participants et aussi sur des structures appelés *centres* ou *nœuds* selon leur degré d'implication en ressources humaines et financières. Le 11 mai 2022 a été officialisée l'ouverture du nœud français hébergé par l'université de Cergy, sous la houlette d'Emmanuel Rollinde, professeur de didactique des sciences. Ce nœud a pour but clairement affiché de fédérer les efforts en matière d'éducation à l'astronomie (acteurs, ressources, formation) en France et plus largement dans l'espace francophone.

https://oaenf.cyu.fr/

■

SAISONS, HAUTEUR DU SOLEIL ET PROGRAMMATION D'UN ARDUINO

Hervé Faivre, enseignant de sciences physiques,
Pierre Causeret, enseignant de mathématiques en retraite

Les auteurs proposent une maquette grand public montrant le rôle important de l'inclinaison des rayons solaires dans l'explication des saisons. Maquette entièrement autonome et qui peut être empruntée

Le Jardin de l'Arquebuse de Dijon (anciennement Jardin des Sciences de Dijon) regroupe un muséum, un jardin botanique et un planétarium. Chaque année, il réalise une exposition temporaire. En 2020, ce fut sur le thème des saisons. En raison de la pandémie et des confinements, cette exposition est restée deux années à l'affiche, jusqu'au tout début 2022.



Pour réaliser la première partie intitulée « Les saisons, c'est astronomique ! », le Jardin des Sciences a fait appel à l'enseignant chargé des relations du planétarium avec les scolaires, Hervé Faivre, ainsi qu'à celui qui occupait ce poste auparavant, Pierre Causeret. Nous avons alors tenté de répondre à la question « Comment expliquer les saisons au grand public ? » et ceci, seulement à partir de panneaux et de maquettes, sans l'intervention d'un médiateur scientifique.



Nous avons proposé quatre maquettes :

- une carte tournante du ciel pour montrer que les constellations visibles changeaient au cours de l'année ;
- une maquette représentant le mouvement apparent du Soleil aux solstices et aux équinoxes qui fera sans doute l'objet d'un prochain article ;
- une maquette représentant la révolution de la Terre autour du Soleil ;
- une maquette montrant l'importance de la hauteur du Soleil sur la température au sol.

C'est cette dernière maquette que nous allons présenter ici.

La hauteur du Soleil

Pourquoi fait-il plus chaud en été ? La réponse classique que vous trouverez développée dans différents articles des Cahiers Clairaut, c'est parce que les journées sont plus longues et que le Soleil est plus haut dans le ciel, ces deux phénomènes provenant de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite.
Mais comment montrer le rôle de la hauteur du Soleil ? Pourquoi un soleil haut chauffe davantage le sol qu'un soleil bas, éclairant en lumière rasante ? Différents schémas ou calculs sont possibles mais l'expérience du chocolat, détaillée dans le n° 161 des Cahiers Clairaut, est assez convaincante.



Fig.1. **L'expérience du chocolat. Deux lampes identiques fixées au bout de bras de même longueur sont inclinées à 20° et 66° par rapport à l'horizontale. La première représente le soleil de midi au solstice d'hiver, la seconde, le soleil de midi au solstice d'été. On place à la base deux carrés de chocolat et on allume en même temps les deux lampes. Après 5 à 10 minutes, on appuie avec deux doigts sur les deux chocolats. Seul le second a fondu.**



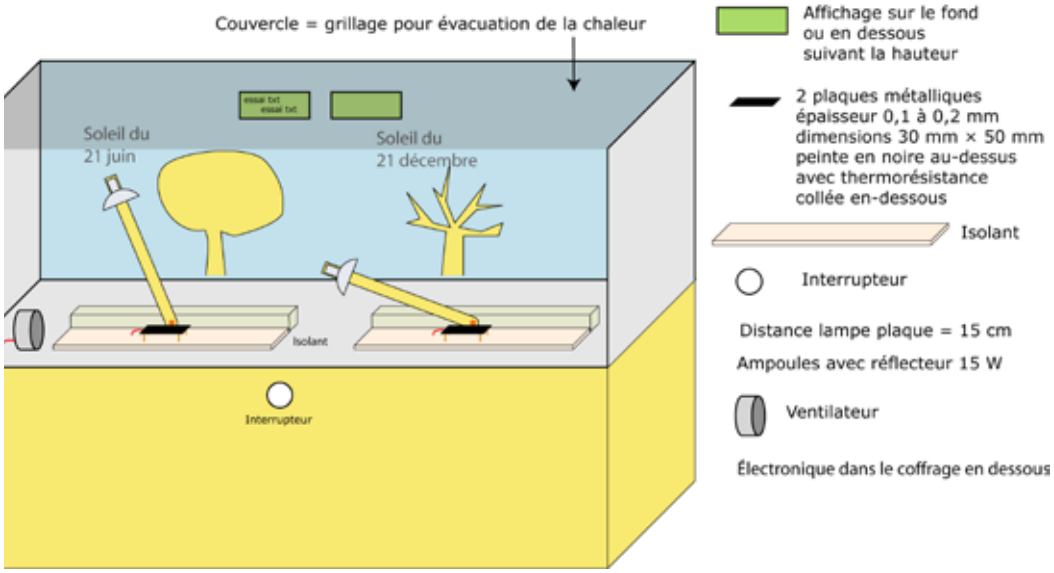
Fig.2. **Un schéma classique. Plus le faisceau lumineux est incliné, plus la surface à chauffer sera grande donc moins la température sera élevée. Le faisceau de droite correspond au soleil de midi du 21 décembre et celui du milieu, au soleil de midi du 21 juin, à une latitude de 47° N.**

Principe de la maquette

Nous avons voulu réaliser une maquette représentant l'expérience du chocolat, capable de fonctionner seule, sans animateur.
Nous avons choisi de remplacer le chocolat par une plaque métallique peinte en noir, sous laquelle était fixée une thermorésistance capable de mesurer la température de chaque plaque. La température devrait

s'élever plus rapidement sous la lampe « été » que sous la lampe « hiver ». Mais il fallait également que les deux plaques soient à la même température ou presque au départ. Pour éviter d'avoir à attendre trop longtemps entre deux expériences, nous avons prévu un ventilateur du côté de la lampe « été ». La figure ci-dessous montre le plan fourni au Jardin des Sciences.

Pour toute la partie électronique, achat des composants et programmation, c'est Hervé Faivre qui s'en est occupé.



La partie électronique

La maquette fonctionne avec des composants standards des projets Arduino. Un peu de recyclage et de récupération pour certains, pour les autres on les trouve facilement chez son fournisseur d'électronique préféré ou en ligne sur les sites spécialisés Arduino.

- un arduino (MEGA pour un nombre de ports E/S disponibles plus important que sur UNO) ;
- deux spots halogènes 30 W, les plus directifs possible sous 12 V avec leur transformateur ;
- deux relais 5V/230V ;
- un bouton (robuste) ;
- deux thermistances CTN 10 kΩ de précision ;
- deux écrans LCD 16 caractères sur 2 lignes. (un par saison pour séparer les affichages). On peut les connecter en série (sur un bus I2C) mais dans ce cas il faut changer l'adresse d'un des deux en utilisant un jumper (par défaut l'adresse est la même : 0x27). Ici ils sont connectés sur des broches numériques différentes ce qui représente, rien que pour l'affichage 12 sorties contre seulement 2 (SCL et SDA) en I2C d'où l'utilisation d'un Arduino Méga plutôt qu'un UNO (le surcoût est marginal) ;
- deux potentiomètres 10 kΩ pour régler l'intensité du rétroéclairage des écrans LCD (en I2C c'est déjà intégré sur le module pour à peine plus cher) ;
- une résistance 1 MΩ pour l'interrupteur ;
- un ventilateur pour réinitialiser l'expérience ;
- de la pâte thermique pour coller la sonde de température à la petite plaque métallique peinte en noir représentant l'unité de surface exposée aux rayons inclinés du soleil halogène ;
- une plaque d'essai breadboard pour les connexions (selon le budget, on peut opter pour une platine grove qui facilite grandement les connexions).



Le matériel pour la partie électronique : CTN 10K à 25 °C, bouton robuste, écrans LCD 1602, Spot 30 W, relais et ventilateur utilisés.

Le principe de fonctionnement

Le programme est téléchargeable sur le site du CLEA[1].

[1]=> L'affichage invite l'expérimentateur à appuyer sur le bouton pour démarrer l'expérience.



[2]=> L'expérience commence :

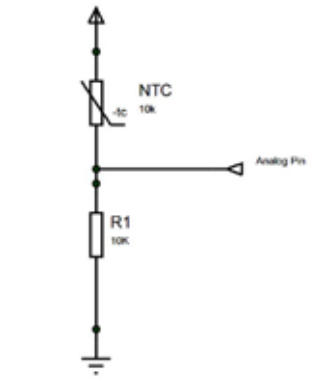
- le relais 1 est actionné et les spots s'allument ;
- les écrans affichent la température de chaque plaque et le temps d'expérience restant (entre 30 et 45 s semble être un bon compromis) avec le message clignotant « expérience en cours » ;
- la température est mesurée 10 fois en une seconde et une moyenne est effectuée sur ces valeurs avant le rafraichissement de l'affichage afin d'éviter un clignotement sur la première décimale ou une fluctuaction erratique de celle -ci.

[3]=> À la fin des 45 s, le relais 1 coupe les spots et le relais 2 démarre le ventilateur.
Les écrans affichent l'écart maximal enregistré entre les températures T1 (été) et T2 (hiver) ainsi que le message clignotant « ventilation en cours / patientez ».

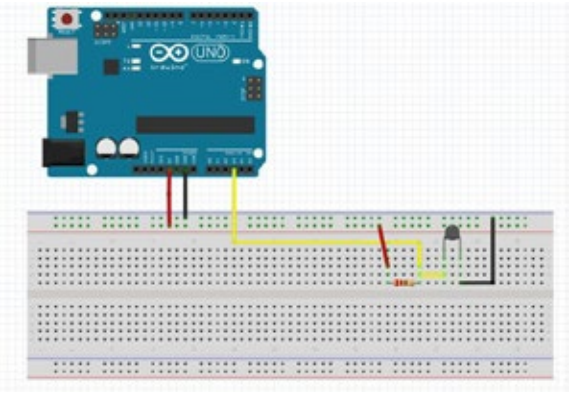


- La ventilation se poursuit jusqu'à ce que la différence de température entre les sondes soit inférieure à 0,5 °C (une durée maximum de 30 s est fixée pour éviter une poursuite intempestive de la ventilation en cas de problème sur une sonde).
- Le relais 2 est coupé, la ventilation s'arrête, la boucle principale du programme reprend à l'étape [1].

1 à l'adresse www.clea-astro.eu en cliquant sur Cahiers Clairaut n° 178 été 2022.



Pont diviseur de tension et mesure sur une entrée analogique (ici A3).



Quelques détails pour la programmation

Principe de la mesure d'une température avec une thermistance sur une entrée analogique de l'Arduino

Les CTN (coefficient de température négative) sont des thermistances dont la valeur de la résistance diminue lorsque la température augmente. La plage d'utilisation est assez vaste et le temps de réponse assez court. La valeur nominale de la CTN est sa résistance à une température de 25 °C.
La relation de Steinhart-Hart permet de déterminer la valeur de la résistance de la CTN en fonction de la température.

$$\frac{1}{T} = A + B\ln(R) + C[\ln(R)]^3$$

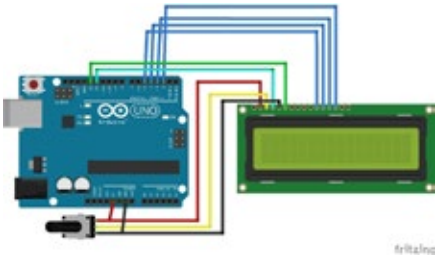
On peut étalonner la résistance en réalisant 3 mesures de résistance de la CTN pour 3 valeurs de température de référence connues avec précision, mais les coefficients sont heureusement donnés dans la fiche technique fournie. Pour la maquette, on inverse en fait la formule pour avoir la température en fonction de la résistance. Cette dernière est déterminée en mesurant sur une entrée analogique de l'Arduino le potentiel au point médian d'un diviseur de la tension de référence Vcc avec une résistance fixe de 10 kΩ. La valeur est codée sur 10 bits : une valeur est mesurée de 0 à 1 024 correspondant à un potentiel de 0 V à + Vcc.

Alimentation des spots

L'utilisation des relais permet de piloter les transformateurs d'alimentation des spots en 230 V. Avec cette tension il existe un danger, le montage est naturellement réalisé en ayant bien pris garde de ne pas brancher le cordon d'alimentation sur le secteur. Et il est conseillé de bien isoler le relais (ses bornes côté 230 V) pour éviter tout contact accidentel par la suite.

Connexion des écrans

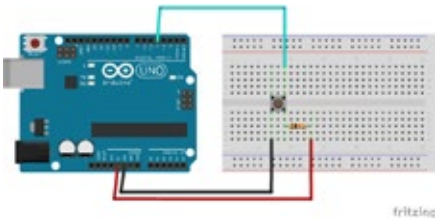
Pour les écrans LCD à 16 caractères sur 2 lignes (LCD 1602), il y a principalement deux options pour les connecter à l'Arduino :



- le montage en lignes parallèles en utilisant 6 pins par écran ;
- à présent, on trouve plus facilement des écrans utilisant le bus I2C. Cela permet de n'utiliser que 4 pins pour les deux écrans. (+Vcc, Gnd, Scl (horloge), Sda (data)) Il est impératif dans ce cas de bien changer l'adresse d'un des écrans en utilisant des jumpers.

Le bouton en INPUT PULL-UP

On peut relever le niveau bas sur le pin flottant pour détecter un appui sur le bouton mais des fluctuations du potentiel pour différentes raisons pourraient être interprétées par l'appareil comme un appui sur le bouton. Pour éviter cela on définit l'entrée en pull-up. En utilisant une forte résistance (typiquement 1 MΩ), l'entrée est maintenue au potentiel Vcc, à l'état HAUT et l'appui sur le bouton force un état BAS. Le programme doit alors réagir à un front descendant sur l'entrée



numérique.

Chonométrage

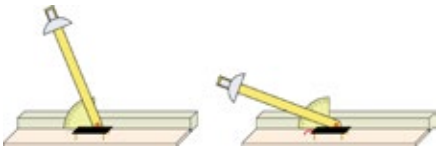
Pour le chronométrage, on utilise la fonction de l'horloge interne millis() qui renvoie une valeur de type unsigned long correspondant au nombre de millisecondes écoulées depuis le début du lancement du programme. On crée une variable Previous_millis du même type unsigned long qui prend la valeur de millis() avant d'entrer dans une boucle while qui doit être éxécutée pendant un certain temps : ici 45 s.

```
Previous_millis = millis();
while (millis() - Previous_millis <= 45000) {
        chose_à_faire() ;
}
```

Une variable entier long non signée stocke une valeur sur 4 octets (32 bits) nécessairement positive entre 0 et 2^{32} - 1 (= 4 294 967 295). En ms, cela représente environ 49,7 jours. En théorie, si on lance une expérience quelques secondes avant cette limite le programme plantera car **millis()** repart à zéro (compte tenu de la faible probabilité que la maquette reste en marche sans interruption aussi longtemps, ce « bug » n'est pas géré dans le code).

Quelques pistes d'amélioration

- ajouter des rapporteurs indiquant l'inclinaison des rayons du Soleil ;



Ajouts de rapporteurs.

- trouver des spots plus directionnels ou guider davantage le flux lumineux avec des tubes ? lentilles ?
- changer le type d'affichage ou ajouter un écran TFT 1,8" couleur pour tracer en couleurs différentes l'évolution des températures ;
- remplacer les connexions sur un breadbord par des connexions sur une platine grove plus solides. Les vibrations lors du transport pourraient créer des faux contacts ;
- ajouter des roulettes pour faciliter le déplacement.

Le résultat

Elle a bien fonctionné, nous pensons qu'elle a servi à un certain nombre de visiteurs à mieux appréhender le rôle de la hauteur du Soleil mais nous nous sommes aperçus que le principe n'était pas toujours bien compris. Surtout lorsque les visiteurs ne lisent pas les textes, que nous avions pourtant essayé de faire assez courts. Une personne qui explique, interroge et répond aux questions, est quand même très utile pour faire passer un message...

L'exposition est maintenant terminée, la maquette n'a pas été jetée, elle est depuis peu la propriété du Clea. Elle est à la disposition de tous les adhérents mais ses dimensions (L = 100 cm, l = 43 cm, h = 52 cm) font que le transport n'est pas très facile

■



La maquette terminée.

...

Dossier

Ciel noir



Pollution lumineuse



La ville de Genève photographiée le 26 septembre 2019 avec et sans éclairage depuis le même point de vue, dans le cadre de l'opération La nuit est belle : 152 communes de la zone transfrontalière autour du Grand Genève (76 communes françaises, 45 genevoises et 28 vaudoises) n'ont pas allumé leur éclairage public le soir de ce 26 septembre. Malheureusement, le ciel était couvert cette nuit-là (voir article page 16).

Photos Société Astronomique du Léman

La pollution lumineuse est à la fois la présence nocturne anormale ou gênante de lumière et les conséquences de l'éclairage artificiel nocturne sur la faune, la flore, la fonge (le règne des champignons), les écosystèmes ainsi que les effets suspectés ou avérés sur la santé humaine.
Comme celle de pollution du ciel nocturne qui la remplace parfois et qui désigne particulièrement la disparition des étoiles du ciel nocturne en milieu urbain, la notion de pollution lumineuse est apparue dans la deuxième moitié du XIXe siècle et a évolué depuis.

(extrait de l'article *Pollution lumineuse* de Wikipedia).

Ciel noir et pollution lumineuse dans les productions du Clea

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (clea-astro.eu/archives).
(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site clea-astro.eu, archives des CC).
Vol de nuit : la pollution lumineuse, CC 169 (2019), COLAS Jean-Luc.
Sauver la nuit, CC 169 (2019) Recension d'ouvrage.
L'Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes, CC 150 (2015), BLU Paul.
Compteur d'étoiles CC 145 (2014) FOUQUET Jean-Luc.
Heure d'hiver, Heure d'été et économies d'énergie CC 74 (1996) TRYOEN Victor.
Combien d'étoiles visibles à l'oeil nu CC 54 (1991) VIALLE Jacques.
Les lumières de la nuit, CC 51 (1990), SUAGHER Françoise.
Évaluation du nombre d'étoiles plus brillantes qu'une magnitude donnée CC 21 (1983) SUAGHER Françoise.

Sur le site du CLEA (www.clea-astro.eu), onglet lunap
En cliquant sur le terme *Pollution lumineuse* de l'index, vous trouverez un court historique, une présentation de ce qu'est la pollution lumineuse, des activités avec un carnet d'observation, des ressources...

Dans les hors-séries des Cahiers Clairaut
HS 11 Le compteur d'étoiles p 118.

LAISSEZ LES ÉTOILES NOUS ÉBLOUIR

Olivier Gayrard, Gaillac

L'article suivant a pour objectif de décrire le déroulement des activités menées au sein d'un club d'astronomie auprès d'une vingtaine d'élèves de classes de 6e à la 4e quant à la protection du ciel étoilé. En souhaitant que cet article et le travail des élèves participent à laisser les étoiles nous éblouir, pour toujours.

« Illustrer la science » est un projet collaboratif de culture scientifique et technique piloté par la Délégation académique à l'éducation artistique et culturelle d'Occitanie. Le thème de cette année visait des objectifs de développement durable, mettant ainsi en avant l'année internationale des sciences fondamentales au service du développement durable 2022. L'Assemblée générale des Nations unies a décliné sa vision du futur en dix-sept objectifs de développement durable (ODD) vers lesquels nous devons tendre collectivement tous, nécessitant l'apport de la science et de la technologie. Dix-huit établissements scolaires ont participé à ce projet, dont les élèves du club d'astronomie de Saint-Joseph, qui se sont emparés du neuvième ODD : industrie, innovation et infrastructure, thème technologie et procédés respectueux de l'environnement. Notre projet était sur les rails ; nous allions étudier l'impact de la pollution lumineuse sur l'environnement et les moyens de remédier à ses effets négatifs.

Mais avant toute recherche et analyse, il était nécessaire d'ancrer dans la réalité notre réflexion par une observation du ciel. C'est ainsi que dans la soirée du 15 octobre 2021, nous nous sommes réunis chez des parents d'élèves sur les bords du village de Castelnau-de-Montmiral. L'observation dans le crépuscule civil d'un quartier de Vénus nous a permis de marcher dans les pas de Galilée. Puis en tournant nos deux télescopes Dobson en direction de Jupiter, nous avons constaté à notre tour qu'il existait un « autre centre dans l'Univers », mettant un coup fatal aux thèses d'Aristote. Cerise sur le gâteau, ou plutôt satellite sur planète, nous avons observé le passage de l'ombre d'Io devant le disque de Jupiter. Un peu plus à l'ouest sur l'écliptique, la vision des anneaux de Saturne à travers l'oculaire grossissant 70 fois nous a émerveillés. Le crépuscule astronomique étant atteint, c'est guidé par un laser vert que les élèves ont pu projeter mentalement les astérismes des principales constellations de nos cherche-étoiles sur la voûte céleste. Quel plaisir d'apprendre sous les étoiles ! Cette première sortie a permis de développer le sens de l'observation, de donner une explication rationnelle aux phénomènes astronomiques. Elle est aussi le point de départ d'autres activités de calculs et de construction de maquettes. Pour toutes ces raisons et bien d'autres encore, il nous faut à tout prix préserver le ciel nocturne.

Tout succès d'une opération réside dans la connaissance de son ennemi. Nous devons donc à présent définir ce qu'est la pollution lumineuse. Pour cela, nous avons utilisé l'introduction du m@gistère[1] *Enjeux de préservation du ciel et de l'environnement nocturnes*[2]. Dans l'activité « Quelques impacts de la pollution lumineuse » se trouvent neuf cartes retournables en cliquant dessus. Il faut alors trouver le lien entre l'indice proposé sous forme d'une photographie au recto et l'impact de la pollution lumineuse. L'hypothèse est vérifiée en retournant la carte et en lisant le texte du verso.
Si les élèves ont trouvé plusieurs explications, et souvent pertinentes quant aux cartes avec une photo d'oiseaux, d'arbre, de papillon de nuit, de grenouille, d'observatoire, de chauve-souris et de rêveur, pour d'autres ils ont dû donner leur langue au chat. Un « doudou » d'enfant, un stéthoscope semblent n'avoir aucun lien avec la pollution lumineuse. Ce fut l'occasion de découvrir le rôle essentiel de la lumière naturelle sur les rythmes biologiques et le système hormonal ainsi que les effets négatifs sur la santé humaine de l'éclairage artificiel. Cette activité a remporté un vif succès auprès des élèves qui ont pu rédiger leur propre définition de la pollution lumineuse : « dôme de lumière artificielle au-dessus des villes qui peut aveugler et empêcher la reproduction des êtres vivants. Cela peut nuire à la Vie en général ».

Ayant pris conscience que ce problème était l'affaire de tous, les élèves m'ont demandé s'ils pouvaient en parler en classe. C'est avec l'aide de Mme Claire Munier, professeur de français, que la suite du travail a été menée. Les quatre BD suivantes ont été projetées à deux classes de 6e et deux classes de 5e, mais avec des bulles vierges. Sur l'idée originale du m@gistère, un texte en lien avec l'image était distribué, les élèves devant l'exploiter afin

1 m@gistère est un dispositif de formation en ligne mis en œuvre par le ministère de l'Éducation nationale. m@gistère s'adresse en particulier aux enseignants du 1er et du 2nd degré.
2 Sylvain Rondi.



Fig.1. **Travaux d'écriture d'élèves de 6° et 5° ; photo de l'auteur, dessins BdNF..**

de compléter les bulles. Ce travail d'écriture a fait sens auprès des élèves qui s'y sont pleinement investis ; en voici un florilège choisi par les membres du club (figure 1).

Fort de nos nouvelles connaissances, nous devons maintenant évaluer l'impact de la pollution lumineuse dans notre propre environnement. Pour rendre rationnelle notre démarche, il est nécessaire d'établir les grandeurs caractéristiques en termes de quantité et de type de lumière, ainsi qu'établir la manière de les mesurer. La prochaine sortie du club astro sera donc exceptionnellement … en ville !

Les espèces nocturnes (tout ou partie), représentent 30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés. Leurs systèmes de vision sont dès lors très sensibles à la lumière directe ; un lampadaire peut être source d'éblouissement. Pour en rendre compte il faut mesurer la luminance en cd/m^2, soit l'intensité lumineuse rapportée à la surface d'émission de la lumière[3]. D'après cette définition, plus la surface est petite et l'intensité grande, plus la luminance et l'éblouissement seront importants. Il apparaît donc que les systèmes d'éclairage par DEL sont particulièrement éblouissants par rapport par exemple aux lampes à décharge. Pour transformer une photographie en une image de luminance et évaluer l'éblouissement, nous avons utilisé l'application Bright Minds® App de Fusion Optix[4]. Sur la cartographie de luminance de la figure 2, nous constatons un point plus que trois fois supérieur à la luminance du ciel, produisant, tout du moins pour un œil humain, la sensation d'éblouissement.

3 Pour les unités, voir page 34.

4 Cette application gratuite a le mérite de pouvoir être installée aussi bien sur iOS que sur Android. Cependant l'étalonnage n'est pas possible.



Fig.2. **Mesure de la luminance en cd/m², rue Jean Jaurès, Gaillac.**

Afin de mesurer la luminosité du fond de ciel nocturne, nous avons utilisé un Sky Quality Meter (SQM). Les mesures sont exprimées en magnitudes par seconde d'arc au carré, ce qui en fait une grandeur trop complexe pour les élèves du collège. Heureusement, l'échelle qui y est associée parle d'elle-même (figure 3). Nous avons ainsi mesuré au cours d'une promenade, en m/arcsec² les valeurs suivantes, depuis notre établissement au cœur de Gaillac jusqu'aux bords de la rivière Tarn (figure 4) :

- place de la Libération, (13,58) ;
- rue perpendiculaire à cette place (14,03) ;
- derrière le Parc de Foucaud (15,67) ;
- dans la descente vers le Tarn (18,29) ;
- et finalement au bord du Tarn (18,49).

Un simple appui sur le bouton start et la mesure apparaît. Beaucoup plus ludique fut en amont la réalisation des compte-étoiles[5] et leur utilisation in situ. Pour des raisons pratiques nous avons utilisé la constellation de Cassiopée (figure 5), pour ce comptage[6]. Les élèves ont relevé à travers l'ouverture de l'appareil les valeurs suivantes : 4 ou 5 étoiles derrière le Parc de Foucaud et 9 aux bords du Tarn. Pour avoir une idée du nombre d'étoiles visibles au-dessus de l'horizon il suffit de multiplier par cent celui compté soit 900 aux abords de la rivière. Cette dernière valeur, associée à 18,49 m/arcsec² pour la luminosité du ciel, est en adéquation avec les valeurs issues du tableau de la figure 6. Une moyenne réalisée avec d'autres constellations aurait toutefois apporté plus de robustesse à ces mesures.

5 Cahiers Clairaut n° 145, printemps 2014 : Compteur d'étoiles, Jean-Luc Fouquet.
6 http://clea-astro.eu/lunap/pollution-lumineuse.

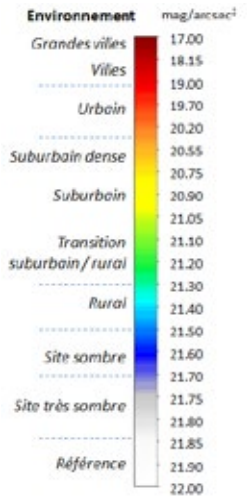


Fig.3. **Échelle des couleurs d'après https://darkskylab.com/blog.html.**



Fig.4. **Promenade du collège au bord du Tarn, extrait de la carte de pollution lumineuse de la France2020 produite par le club AVEX.**

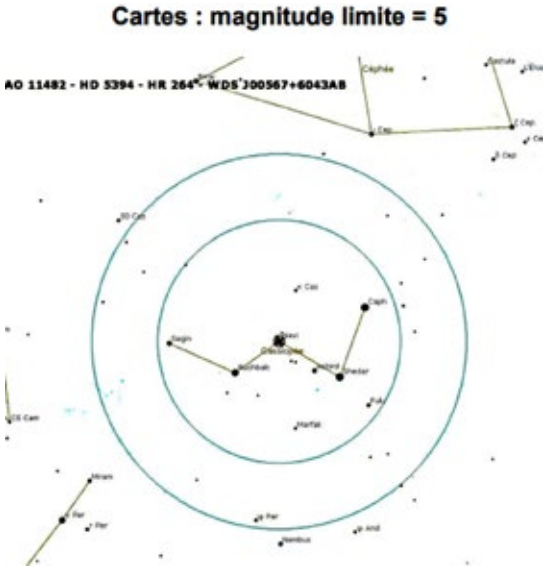


Fig.5. **D'après Lunap, petite encyclopédie astronomique, entrée pollution-lumineuse. Le 16.12.21 à 19 h la Lune se trouvait à 30° de hauteur et Cassiopée à 70°. Elles étaient séparées sur le ciel de 50°.**

Luminosité du ciel (non pollué=1)	Magnitude par arcsec^2	Echelle de Bortle	Magnitude des étoiles visibles à l'œil nu	Nombre d'étoiles visibles à l'œil nu	Visibilité de la Voie Lactée
1	22	2	7	5000	Très bonne
2	21	4	6	3000	Bonne
10	19	6	5	1000	Visible au zénith
100	17	8	3	100	Invisible
500	15	9	1,5	20	Invisible
1000	14	9	0,5	5	Invisible

Fig.6. **Visibilité des étoiles en fonction de la pollution lumineuse. D'après La pollution lumineuse J.E. Arlot, décembre 2016 [7].**

Nous avons déjà vu le cas du phototactisme positif, (espèces attirées par les sources de lumière), avec l'éblouissement qui extermine par exemple les insectes. Qu'en est-il pour les espèces ayant un phototactisme négatif ? Il s'agit cette fois-ci d'une luminosité ambiante qui peut morceler les habitats et stopper les activités animales, jusqu'à causer la disparition de certaines espèces[8]. La grandeur la mieux adaptée pour en rendre compte est l'éclairement (flux lumineux par surface éclairée en lumen/m^2 soit en lux), mesuré avec un luxmètre. Les élèves ont ainsi pu mesurer au cours de leur promenade des valeurs allant de 350 lux (figure 7) à 0 lux.



Fig.7. **La mesure de l'éclairement faite en posant le luxmètre à même le trottoir a révélé une valeur de 350 lux ! La taille des élèves en avant plan donne une indication de la distance séparant le spot DEL du luxmètre. Cette valeur est à comparer à celle de 300 lux, qui assure un éclairement suffisant sur un poste de travail avec des tâches ne nécessitant pas de perception de détails[9]. Le professeur tient la fibre du spectrophotomètre, les élèves l'ordinateur portable.**

Les lumières émises par le Soleil et par un lampadaire sont différentes. Pour mettre en évidence la composition de la lumière, nous avons eu recours à l'utilisation d'un spectrophotomètre à fibre optique SPID, emprunté au laboratoire du lycée. Chaque groupe d'espèces animales présente sa propre sensibilité à la lumière en fonction des plages de longueurs d'onde. Mais en l'état des connaissances, les lumières ambre orange sont à privilégier[10]. En effet la lumière bleue est plus diffusée que la lumière rouge et impacte davantage la noirceur du ciel. Par ailleurs cette lumière bleue a des conséquences sur différents mécanismes biologiques, (photosynthèse, cycle circadien…).

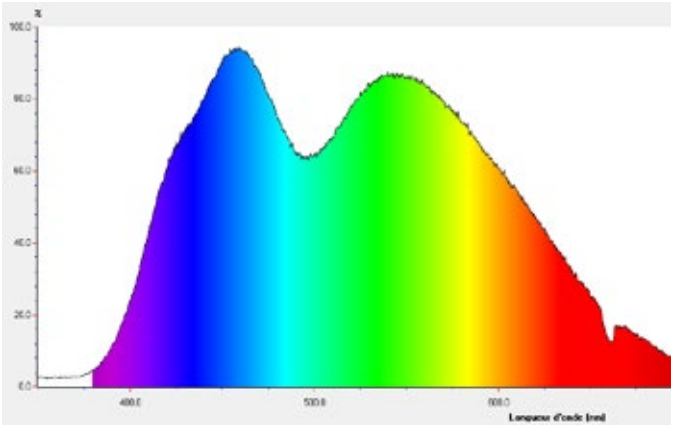


Fig.8. **Spectre de la lumière émise par le spot de la figure 7. Bien que les DEL présentent des performances énergétiques intéressantes, le pic de lumière bleue est préoccupant quant à son possible impact sur la biodiversité.**

Quelles solutions pouvons-nous apporter à notre échelle et dans notre ville de Gaillac ? Seuls nous ne pouvons rien ; il nous faut rencontrer les acteurs techniques et politiques pour développer ensemble de bonnes pratiques d'éclairage durable. Mme Marie Montels, maire-adjointe au développement durable, à la transition écologique et à la mobilité et M. Piludu, adjoint responsable des travaux et de la vie quotidienne ont accepté de venir rencontrer les élèves. Les 3 900 points lumineux d'éclairage public devant être changés en cours d'année prochaine, les élus sont en pleine réflexion sur la rénovation du parc de l'éclairage public dont le budget était de 552 000 euros en 2021. L'autre problématique soulevée par les élus était : « A-t-on besoin de l'éclairage public ou non, et quand ? ». Le défi étant de répondre au besoin de la réduction de lumière sans négliger la sécurité, car l'éclairage public est nécessaire malgré tout. Un géoréférencement des points lumineux doit être réalisé, afin d'avoir un schéma global à l'échelle de la commune. Éteindre à partir de quelle heure ? Dans quels lieux ? Reprendre le RLP (règlement local publicitaire) afin de diminuer l'impact des enseignes publicitaires. Le chantier est ouvert, mais comme l'ont signalé les élus, il en est des « bonnes idées des élèves comme de la liste des cadeaux de Noël, c'est ce vers quoi

7 http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/images/articles/pollution-lumineuse/la-pollution-lumineuse.pdf

8 D'après J.E. Arlot http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/images/articles/pollution-lumineuse/la-pollution-lumineuse.pdf

9 D'après l'INRS file:///C:/Users/Utilisateur/Downloads/ed85.pdf

10 D'après http://www.trameverteetbleue.fr/

il faut tendre, mais cela a un coût ». Cette rencontre a été riche en informations partagées, les élus ayant apprécié l'investissement des élèves, futurs acteurs de leur ville. Nous nous sommes quittés sur le projet d'une participation à « la nuit est belle » à la rentrée scolaire.

Une solution simple mise en œuvre par les élèves a consisté à expérimenter différents types de réfracteur de lampadaire donnant une direction privilégiée à la lumière émise dans l'espace, (figure 9). Il est essentiel de ne plus envoyer de lumière vers le ciel, ni même à l'horizontale.



Fig.9. **Deux réfracteurs testés. Une assiette plate en plastique recouverte de papier aluminium. Une seconde coupée et repliée en cône.**

Pour estimer les effets autrement qu'à l'œil nu, nous avons utilisé l'application luxmètre de Fizziq[11] qui permet de mesurer la luminance ponctuelle du centre de l'image en pourcentage d'une référence choisie. Ainsi, à une même distance de la source, et en visant la paillasse sans bouger le smartphone, nous avons relevé 100 % pour la valeur de référence de départ, 128 % et 140 % en disposant une assiette plate blanche sans et avec papier aluminium, et enfin 150 % en pliant cette dernière en forme de cône. Les mesures en tournant notre capteur vers le plafond blanc (modélisant un ciel nuageux), ont quant à elles diminuées de 40 à 26 % de la référence (les rideaux de notre salle sont très peu occultants). Il est donc possible de circuler dans la rue de nuit sans difficulté tout en minimisant l'impact des lampadaires. Le temps nous a manqué pour reproduire l'expérience avec des supports plus absorbants que les carreaux des paillasses blanches.

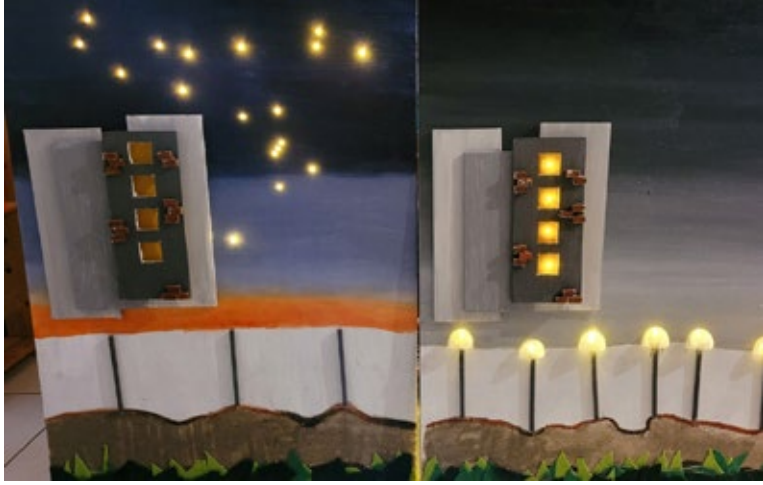


Fig.10. **Diptyque produit par les élèves. Taille réelle 80 cm x 120 cm. Les deux panneaux mobiles s'opposent et interpellent le visiteur. Une même ville, mais des technologies différentes qui modifient notre environnement.**

Notre projet s'est concrétisé par la production de deux panneaux, l'un présentant une ville respectueuse du ciel étoilé, où la biodiversité est riche, l'autre où les lumières de la ville ont éteint les étoiles, et sans vie. Ces productions seront présentées et les démarches explicitées lors d'un colloque au mois de mai à l'Université Paul Sabatier, puis en fin d'année aux élèves des classes de 6e.

Je tiens ici à remercier vivement notre parrain, Renaud Mathevet, (LNCMI UPS - Toulouse III), pour sa disponibilité et les belles expérimentations qu'il nous a présentées sur les spectres lumineux. De même tous mes remerciements à Patricia Maly, professeur d'art plastique pour son aide précieuse. J'ai personnellement découvert la perspective atmosphérique, élément clef dans la construction de notre compréhension du halo de pollution lumineuse.

■

11 https://www.fizziq.org/

ACTUALITÉS

LA NUIT EST BELLE !
AGIR CONTRE LA POLLUTION LUMINEUSE

Isabelle Vauglin, CRAL – Observatoire de Lyon, 69230 Saint-Genis-Laval

L'auteure présente les intérêts de l'extinction des lumières la nuit et incite à la participation à des événements qui promeuvent cette extinction.

Les éclairages nocturnes sont devenus tellement omniprésents partout que le souci principal de toute personne qui veut observer les étoiles est désormais de trouver des lieux suffisamment sombres pour pouvoir voir le ciel nocturne.

Afin de sensibiliser les gens à ce problème de pollution lumineuse, nous avons organisé l'événement « la nuit est belle ! » le 21 mai 2021 qui a conduit 10 communes du Sud-Ouest et de l'Est lyonnais à éteindre la totalité de leur éclairage public pendant une nuit. La nouvelle édition de l'événement aura lieu le 23 septembre 2022 ; près de 40 communes y participeront.

Le but ultime est bien sûr d'arriver à une sobriété lumineuse pérenne et un éclairage public raisonnable dans toutes les villes et villages de France... Mais le chemin est long !

Le problème de la pollution lumineuse

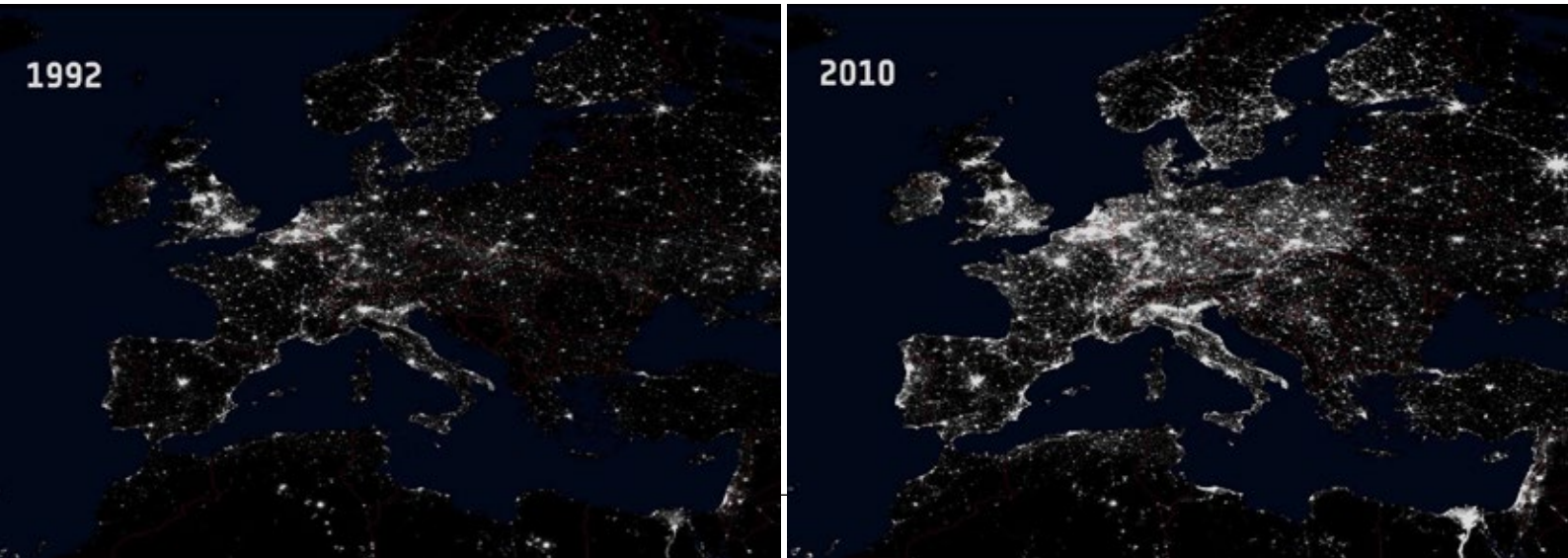
Jusque dans les années 1950, la plupart des humains avaient la possibilité de voir les étoiles, voir la trace de la Voie lactée dès qu'ils levaient les yeux.

L'augmentation de l'éclairage public a entraîné au fil des années une intensification de la pollution lumineuse sur la majeure partie de notre planète. Progressivement, cette pollution a fait disparaître la possibilité de voir la Voie lactée dans toutes les zones urbaines. Seules les étoiles les plus brillantes et les planètes sont aujourd'hui encore visibles dans le ciel nocturne des grandes agglomérations, nous faisant presque oublier l'existence de ces astres et notre place dans l'Univers. Pourtant observer la voûte céleste a largement contribué à faire de l'Humain ce qu'il est devenu, suscitant chez lui des questions fondamentales comme notre place dans l'Univers, l'évolution du temps, structurant les calendriers et l'agriculture.

Cette vision de l'Europe constituée de photos prises en 1992 et en 2010 par le satellite DMSP de l'ESA (figure 1) démontre l'ampleur du problème avec l'augmentation colossale des éclairages nocturnes et révèle aussi la grande inefficacité des éclairages urbains, non optimisés, dont la lumière mal orientée est en grande partie diffusée vers le ciel donc inutilisée au sol. Les contours de l'Europe (et de tous les continents) sont clairement dessinés la nuit uniquement avec l'éclairage de nos villes, la nuit *noire* n'existe plus pour toutes ces zones…

Dès les années 1970, les astronomes ont essayé de lutter contre l'augmentation de cette pollution qui dégradait même les sites d'observation les plus reculés. Mais les études, en particulier celles de l'ANPCEN et de l'ADEME, ont démontré que les nuisances de la pollution lumineuse dépassent désormais largement le domaine de l'astronomie en ayant des impacts négatifs sur la

Fig.1. **Vue de l'Europe la nuit. Entre 1992 et 2010, l 'éclairage public a augmenté de 90 % dans le monde ! (© NGDC/DMSP/ESA).**



biodiversité, sur la santé humaine et sur la consommation d'énergie.

L'événement « la nuit est belle ! »

« La nuit est belle ! » est une action ambitieuse dont le but est de marquer les esprits et permettre à tous les citoyens du bassin lyonnais de retrouver la nuit et ses merveilles pendant une soirée, en faisant éteindre totalement les lumières publiques.
L'événement « la nuit est belle ! » a été créé par l'équipe du Grand Genève menée par Sylvie Vares, sous l'impulsion d'Éric Achkar et Pascal Moeschler : le 26 septembre 2019, 152 communes de la zone transfrontalière autour du Grand Genève (76 communes françaises, 45 genevoises et 28 vaudoises) n'ont pas allumé leur éclairage public le soir du 26 septembre, représentant un territoire éteint de près de 1 000 km² et un million de personnes concernées[1].
Cette première expérience d'extinction totale de l'éclairage public sur une vaste zone a été un vrai succès et a soulevé un enthousiasme général des populations conduisant les organisateurs à prévoir une deuxième édition de « La nuit est belle ! » le 21 mai 2021. Nous avons voulu y associer la région de Lyon.
Les communes de ***Brignais, Chaponost, Charly, Millery, Montagny, Vourles*** et ***Vernaison*** au Sud-Ouest de Lyon ainsi que les communes de ***Jonage*** et ***Meyzieu*** à l'Est ont accepté de participer à l'événement et de ne pas allumer leurs éclairages publics le 21 mai 2021[2].

Cette action est largement ***multidisciplinaire*** car les raisons d'éteindre sont nombreuses :

1. Pour (re)voir les étoiles : du point de vue de l'astronomie, la raison est évidente, les lumières empêchent de voir le ciel et d'observer les astres. La majorité des enfants du monde actuel n'a jamais vu la Voie lactée…
2. Pour préserver la santé humaine : il a été démontré que l'éclairage nocturne a un effet néfaste sur notre cycle circadien. Si l'alternance des périodes de jour et de nuit n'est plus respectée, nos rythmes chronobiologiques sont perturbés entraînant des dérèglements dans la production de protéines, d'hormones. En particulier, trop de lumière la nuit affecte la sécrétion de mélatonine, conduisant à des troubles du sommeil.
3. Pour protéger la biodiversité : la flore et la faune nocturne ont été largement ignorées dans l'explosion des éclairages publics alors qu'elles subissent de plein fouet les conséquences de la pollution lumineuse. Celle-ci est la 2e cause de disparition des insectes après les pesticides. Les papillons de nuit, les chauves-souris, les oiseaux, les mammifères sont affectés parce que trop attirés ou au contraire repoussés par les zones éclairées, perturbant leurs capacités à se nourrir, à se reproduire et à s'orienter. De nombreux écosystèmes sont gravement déséquilibrés du fait de la disparition de l'alternance des jours et des nuits.
4. Pour faire des économies d'énergie : l'éclairage public représente environ 35 % des factures d'une commune ! Les photos de la Terre prises depuis l'espace montrent combien l'énergie lumineuse est en grande partie gaspillée puisqu'elle éclaire en direction du ciel et non du sol. Ce gaspillage coûte cher et n'est plus tenable dans le contexte préoccupant du changement climatique. En ayant une démarche vertueuse et en visant une sobriété énergétique, les communes feraient des économies substantielles, juste avec une réduction de la durée d'éclairage et des lampadaires bien conçus.

Les partenaires lyonnais

Pour organiser « la nuit est belle ! » sur Lyon, j'ai travaillé avec Jenny Sorce (CRAL), la Société astronomique de Lyon (SAL, Bernard Chevalier) et des élus de chacune des communes participantes. Une étroite collaboration avec le Grand Genève a permis de bénéficier largement de leur retour d'expérience et de leur dynamique impulsée par la première édition.
Le CLEA a été partenaire de l'opération et le groupe « ciel étoilé » a proposé des activités pour les scolaires autour d'un système de comptage d'étoiles pour estimer l'impact de la pollution lumineuse. Sur cette base, un carnet d'observations a été créé avec Jean-Michel Vienney et le groupe « ciel étoilé », pour préparer les enfants à repérer les constellations et à comparer l'allure du ciel avec et sans les éclairages publics. Le livret a été distribué aux écoles via les mairies ; il est disponible sur le site du CLEA[3]. Plus de 450 enfants des écoles (de Chaponost et Montagny principalement) ont travaillé avec ce livret grâce à des interventions en classe et sur le temps méridien de membres de la SAL.
Nous avons également proposé aux enfants d'envoyer une lettre à Madame La Nuit. Nous avons reçu plus d'une dizaine de courriers, dessins et poèmes qui ont montré que les enfants parlent de la nuit sans peur et la ressentent plutôt comme quelque chose de calme et reposant.

Les animations pour le public

Pour que la soirée du 21 mai offre une impression positive à tous les publics, nous avions prévu de nombreuses

1 https://www.lanuitestbelle.org
2 https://bit.ly/2QJPEZx
3 http://clea-astro.eu/avec-nos-eleves/observations/la-nuit-est-belle/CarnetObservation-lneb-r.pdf

animations très variées organisées dans les communes participant à l'événement. Cependant, le maintien du couvre-feu instauré à 21 h a obligé à les prévoir en fin d'après-midi et début de soirée.
La luminosité donnée par la Lune le 21 mai (peu après le premier quartier) était idéale pour retrouver cet éclairage naturel non agressif. La volonté était de faire constater que la nuit ne doit pas être associée à la peur et aux ténèbres mais à un moment de calme et de repos. Grâce à la mobilisation de nombreux clubs d'astronomes-amateurs (SAL, CALA, Créactiv' Sciences, club Astro de l'ENS, club Astro de Chaponnay), de multiples points d'observations astronomiques étaient prévus sur tout le territoire éteint. Des promenades au crépuscule à la découverte de la faune, des conférences, des concerts étaient organisées par la FNE, la LPO, le laboratoire LEHNA (CNRS/Université Lyon1), Arthropologia, l'école de musique de Brignais, le Festival de la Bulle d'Or ainsi que des visites des parcs pour se mettre aux aguets et écouter les bruits des animaux de la nuit[4].

Hélas, une météo désastreuse avec une pluie battante toute la nuit a achevé le travail de sape du couvre-feu et de nombreuses animations ont dû être annulées. Celles qui ne l'ont pas été ont eu lieu en salles.
Mais toutes les extinctions prévues ont été réalisées !

La communication sur l'événement



Fig.2. **Deux photos de la commune de Saint-Genis-Laval prises du même endroit le 20 et le 21 mai 2021. Le ciel du 21 mai apparaît plus lumineux à cause d'une lourde couverture nuageuse et de la pluie qui est tombée toute la nuit. La différence allumé/éteint de l'éclairage public est cependant bien visible malgré cela.**

Il était nécessaire de prévoir une très large communication autour de l'événement à la fois pour impliquer les citoyens dans le projet et pour prévenir tous les gens de l'extinction inhabituelle de l'éclairage des rues de leur commune.
La création de pages web spécifiques, liées à celles du Grand Genève, et l'utilisation des réseaux sociaux ont permis d'ajuster les informations jusqu'au dernier moment et de donner au public toutes les précisions sur la soirée. En plus d'affiches dans les commerces et les mairies, les sites web de chaque commune ont été largement utilisés pour informer les habitants.

Le CLEA a diffusé les informations via son site web[5].
Les médias locaux (France 3, Le Progrès, radio Bubble Art, Lyon Métropole) et nationaux (Ciel & Espace) ont relayé cet événement remarquable.

Difficultés et risques liés à une extinction

Dès que l'on envisage l'extinction des lieux publics, la question de la sécurité est soulevée.
Pourtant les enquêtes ont démontré que 80 % des cambriolages ont lieu de jour et, concernant les accidents de la route, que les conducteurs sont plus attentifs et roulent moins vite dans une zone obscure que sur des routes éclairées.

Le bilan des deux soirées d'extinction du Grand Genève (2019 et 2021) et celui de notre soirée 2021 ont confirmé qu'il n'y a pas eu d'augmentation des cambriolages, ni des agressions ni des accidents pendant « la nuit est belle ! »! sur toutes les communes concernées. Les préfectures n'ont recensé aucune difficulté particulière ou incident lié à l'extinction de l'éclairage public.
Mais la crainte de l'insécurité reste l'obstacle le plus difficile à franchir pour convaincre les élus de faire une extinction de l'éclairage public.

Suites de l'événement

Les retours positifs de la population des communes participantes à « la nuit est belle ! » encouragent à faire la prochaine édition. La date sera le vendredi 23 septembre 2022 et nous continuerons à le faire en étroite collaboration avec le Grand Genève. À ce jour, près de 40 communes de la métropole lyonnaise, des Coteaux du Lyonnais et du Parc du Pilat ont déclaré leur volonté de s'associer à l'événement.

L'extinction doit être aussi générale que possible pour que la soirée crée un choc émotionnel sur le public et provoque une large prise de conscience. Nous espérons que la Ville de Lyon et les grosses communes de la Métropole participeront cette

4 https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/perso/isabelle.vauglin/animations-lneb.html

5 http://clea-astro.eu/aLaUne/la-nuit-est-belle-extinction-de-leclairage-public-le-21-mai-au-sud-de-lyon/



Fig.3. **Une rue de Chaponost le soir du 21 mai 2021).**

année, les deux s'étant dites très intéressées mais sans pouvoir participer en 2021.

Nous insisterons pour que les commerces, les zones industrielles et les particuliers éteignent aussi leurs éclairages ce soir-là.

Ces lumières-là restent vraiment gênantes quand l'éclairage public est éteint (figure 3).

Nous avons débuté le travail avec les scolaires pour que les enseignants soient plus nombreux à travailler autour de l'événement avec leurs élèves. Parce que les enfants sont des vecteurs efficaces de l'information et qu'ils sont les premiers concernés par l'avenir de notre planète, I. Vauglin a fait une intervention devant les conseils municipaux des jeunes (CMJ) de Brignais et des alentours le 30 avril 2022 afin de leur expliquer en détails les raisons qui justifient de mettre en place un tel événement et rappeler ses objectifs. Une intervention similaire est prévue en juin à Albigny-sur-Saône pour les CMJ des communes du Nord de Lyon qui participeront à « la nuit est belle ! » 2022.

Par ailleurs, pour porter « la nuit est belle ! » sur une zone aussi large que possible, la commune de Longchaumois dans le Parc naturel régional du Haut-Jura a été contactée. Volontaire pour participer, cette commune a incité les autres membres de sa communauté de communes à éteindre aussi le 23 septembre prochain. L'ensemble des communes du PNR du Haut-Jura sont sollicitées pour participer. I. Vauglin fera une intervention le 20 juin devant les élus de ces communes pour leur détailler le projet et leur montrer l'importance qu'il y a à agir.

Il est urgent que les humains retrouvent la nuit, de faire prendre conscience à tous de l'univers qui est au-dessus de nos têtes. Retrouver le lien vers le ciel permet de retrouver le lien avec notre Terre, ce petit vaisseau spatial magnifique et fragile dans lequel nous sommes tous membres de l'équipage et que nous avons mis en péril. Même si les astrophysiciens ont découvert de nombreuses exoplanètes, la Terre est unique et nous n'avons pas de plan B. Il est de notre devoir de la préserver pour la transmettre vivable à nos enfants. Alors,

Faites éteindre votre territoire en 2022 pour

- Revoir les étoiles ;
- Redonner de la place à la faune qui souffre de notre pollution lumineuse et un espace de vie adapté à la flore ;
- Redonner aux humains la possibilité d'avoir un cycle jour/nuit normal ;
- Économiser l'énergie en allant vers des éclairages publics plus soucieux d'efficacité et sans gaspillage et s'engager sur une réduction pérenne de la lumière inutile.

Les membres du CLEA sont présents sur toute la France. N'hésitez pas à solliciter vos élus pour que votre commune aussi participe à l'extinction de l'éclairage public. Si vous avez envie de développer l'événement sur votre commune en 2022, n'hésitez pas à me contacter (Isabelle.vauglin@univ-lyon1.fr).

Bibliographie

- *Concevoir et utiliser l'éclairage en préservant l'environnement nocturne*, guide publié par l'ANPCEN et l'Association des maires de France, novembre 2018.
- *The First World Atlas of the artificial night sky brightness*, P. Cinzano, F. Falchi & C.D. Elvidge, MNRAS 2001, traduction en Français par l'ANPCEN *Le premier atlas mondial de la clarté artificielle du ciel nocturne* (voir le site de P. Cinzano : http://www.lightpollution.it/worldatlas/)
- *Revoir les étoiles, naissance d'une revendication* Razmig Keucheyan, Le Monde diplomatique, août 2019.
- Site la nuit est belle ! Lyon : https://bit.ly/2QJPEZx

■

LE GROUPE CLEA « CIEL ÉTOILÉ »

COMPTE RENDU D'ACTIVITÉ

Sylvie Thiault, s.thiault@orange.fr

Lors du CA du 30 janvier 2021, le groupe de travail « lien entre les adhérents » dont Olivier Gayrard était le rapporteur a fait plusieurs propositions pour maintenir le lien entre les adhérents en cette période très particulière de confinement que nous traversions qui avait vu l'annulation de l'école d'été et de l'assemblée générale annuelle du CLEA.

Le groupe a proposé la mise en place de projets participatifs en distanciel à partir d'activités qui font l'ADN du CLEA ou de nouvelles activités à élaborer et tester.

Un premier thème a été retenu : la pollution lumineuse.

Un appel a été fait sur la liste de diffusion à l'ensemble des adhérents du CLEA pour une première réunion « à distance » sur la plateforme zoom d'une durée de 45 minutes le 24 février 2021.

Les 10 réunions suivantes se sont tenues sur la plateforme Framatalk offrant sensiblement les mêmes possibilités, et posant moins de problème en termes de confidentialité.

Un atelier de l'école d'été 2021 a permis de présenter l'avancée de nos réflexions et de les enrichir.

La première réunion avait réuni 19 participants. Au fil du temps l'effectif des présents s'est stabilisé à une petite dizaine de personnes.

Nous avons vite préféré un titre plus « positif » en intitulant le groupe : « ciel étoilé ».

Une liste de diffusion et un espace de partage de fichiers ont été ouverts. Et les comptes-rendus de chaque séance ont été diffusés à l'ensemble des membres du groupe.

L'idée première était de proposer un protocole utilisable avec les élèves pour recueillir des données (prises de vue, comptages d'étoiles…) en partant de la démarche de science participative de Globe at night (https://www.globeatnight.org/).

La première réunion a fourni de nombreuses pistes en lien avec l'astronomie mais aussi avec le développement durable, la santé, la préservation de l'environnement.

Des questions à se poser avec les élèves ont émergé. Qu'est-ce que la pollution lumineuse ? Pourquoi c'est une pollution ? Cause-t-elle des dommages ? À qui ? À quoi ? Peut-on y remédier ? Pourquoi l'obscurité est-elle importante ?...

Au fil des séances ont été réalisés :

- des essais de mesure de la luminosité du ciel ;
- le repérage d'articles dans les Cahiers Clairaut sur le thème de la pollution lumineuse ;
- des activités de sensibilisation à l'existence d'une pollution lumineuse. (voir page 16) ;
- des modélisations d'un éclairage public (voir page 11) ;
- un protocole et un carnet d'observation pour évaluation de la qualité du ciel ;
- la création et le développement d'un onglet de LUNAP L'univers à portée de main (http://clea-astro.eu/lunap).

Le carnet d'observation

Un prototype de carnet d'observation, devait être utilisé le 21 mai 2021 lors de l'événement « la Nuit est Belle » sur la région lyonnaise, mais la météo défavorable ne l'a pas permis. Quelques classes l'avaient testé dans les soirées précédentes.

Pour aider au comptage, le carnet comporte des cartes permettant de repérer les étoiles cibles choisies (à centrer dans le compteur d'étoiles).

Le carnet s'est enrichi d'un questionnement sur les dommages de la pollution lumineuse, illustré par des vignettes de bande dessinée proposées par les élèves de sixième du collège St-Joseph de Gaillac.

Le protocole

Quatre étoiles sont proposées en fonction de la date d'observation. En utilisant le « compteur d'étoiles » (figure page suivante), décrit dans le n° 145 des Cahiers Clairaut[1], l'observateur consigne ses données dans un carnet d'observation individuel. Ce carnet permet de faire un travail collectif ultérieur.

Un carnet est proposé pour chaque saison ainsi qu'une version adaptable.

Les étoiles proposées sont faciles à repérer, et réparties à diverses hauteurs dans le ciel afin de pouvoir mettre en évidence les effets d'absorption de l'air, et de la pollution lumineuse (plus gênante près de l'horizon qu'au zénith).

1 Article de 2014 accessible en ligne à l'adresse http://clea-astro.eu/archives/cahiers-clairaut/CLEA_CahiersClairaut_145_06.pdf

Date	Jour	Heure légale

État du ciel

Couverture nuageuse (%) :	Brume	Humidité :

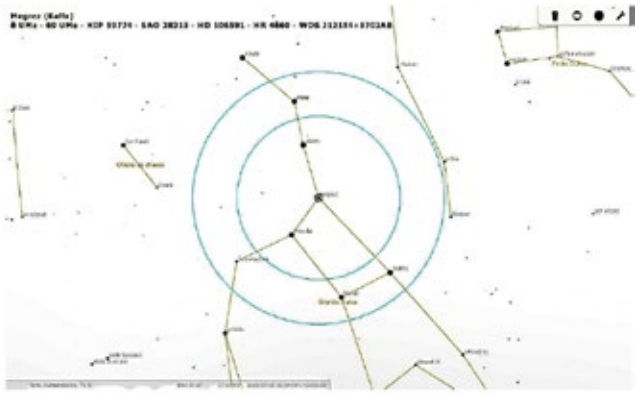
Présence de la Lune

Phase (ou âge)	Hauteur (en °)

Durée d'accoutumance à l'obscurité :

Comptage d'étoiles

Constellation	Étoile visée	Azimut	Hauteur	Étoiles visibles
Lyre	α Lyr (Véga)			
Grande Ourse	δ UMa (Megrez)			
Cassiopée	γ Cas (Navi)			
Aigle	α Aql (Altaïr)			



Extraits du carnet d'observation du ciel d'été.

Les étoiles cibles choisies (à centrer dans le compteur étoiles).

Printemps : *Capella* (α Aur) ; *Arcturus* (α Boo) ; *Régulus* (α Leo) ; *Megrez* (δ UMa)

Été : *Megrez* (δ UMa) ; *Véga* (α Lyr) ; *Altaïr* (α Aql) ; *Navi* (γ Cas)

Automne : *Véga* (α Lyr) ; *Navi* (γ Cas) ; *Capella* (α Aur) ; *Sadr* (γ Cyg)

Hiver : *Navi* (γ Cas) ; *Mirfak* (α Per) ; *Alnilam* (ε Ori) ; *Capella* (α Aur)



Le compteur d'étoiles est constitué d'une couronne en carton de 12 cm de diamètre intérieur et d'une ficelle de 42 cm. La partie visible du ciel située à l'intérieur de la couronne placée à 42 cm de l'œil représente 1 % de l'ensemble du ciel visible. Il suffit de compter le nombre d'étoiles visibles à l'intérieur et de multiplier par 100 pour avoir une idée du nombre total d'étoiles visibles à une heure donnée. On obtient une valeur plus précise en effectuant plusieurs mesures dans différentes directions.

Sur LUNAP (L'UNivers À Portée de main) http://clea-astro.eu/lunap

Un nouvel onglet « pollution lumineuse » a été créé.
Tout d'abord restreint aux membres du groupe "ciel étoilé", l'accès est maintenant accessible à tous..
La rubrique « En bref » pose la problématique.
La rubrique « Activités » archive le carnet d'observation, son document d'accompagnement, des notices…

La rubrique « Ressources » recense des ressources bibliographiques, numériques…

La rubrique « Approfondissements » attend toujours des articles plus pointus comme par exemple la diffusion dans l'atmosphère de la lumière suivant les différentes longueurs d'onde.

Les événements « La nuit est belle » du 23 septembre 2022 (https://www.lanuitestbelle.org/) et
«Le Jour de la Nuit» du 15 octobre 2022 (https://geophoto.agirpourlenvironnement.org/le-jour-de-la-nuit/) peuvent être un prétexte à la mise en route d'un projet de sensibilisation des élèves à la préservation du ciel nocturne.





Une réunion à distance est envisagée en septembre pour aider à la mise en place de projet. Elle sera annoncée via la liste de diffusion générale du CLEA.
Et pourquoi pas un espace sur le site du CLEA pour des comptes-rendus, des améliorations, des idées de prolongement.

■

PLAIDOYER NATIONAL POUR L'ENTRÉE DE LA POLLUTION LUMINEUSE DANS LES TEXTES DE RÉFÉRENCE

Association nationale pour la protection du ciel et de l'environnement nocturnes (ANPCEN)

Ce texte présente les actions menées par L'ANCPEN pour lutter contre la pollution lumineuse en particulier par l'adoption de textes de loi.

Quatre lois

Outre un travail de terrain près des citoyens et des collectivités depuis plus de vingt ans, l'ANPCEN mène depuis plus de 10 ans un plaidoyer national entièrement bénévole pour sensibiliser gouvernement, parlement, État, réseaux nationaux, aux enjeux et solutions pour réduire la pollution lumineuse. Ce travail persévérant a permis notamment de faire inscrire la pollution lumineuse dans quatre lois de 2009 à 2016 et de voir légitimées auprès de ceux qui voulaient la nier, la réalité de cette pollution et la nécessité d'agir. L'ANPCEN, après deux ans de suivi parlementaire, a notamment fait inscrire dans la loi votée en 2016 que « les paysages nocturnes sont un patrimoine commun de la Nation » et le « devoir pour tous de protéger l'environnement nocturne ».

Décrets et arrêtés

Un décret paru en janvier 2012 pour les enseignes et publicités lumineuses fixe des conditions et limitations de durée d'éclairement, avec dérogations et exceptions... Les autorités publiques chargées de son application n'en rendent jamais compte et le suivi, le contrôle et les sanctions sont à peu près inexistants. Il n'est pleinement entré en vigueur que six ans plus tard. Désormais, globalement, enseignes et publicités lumineuses doivent être éteintes entre 1 h et 6 h du matin ou 1 h après la cessation d'activité.

Un arrêté publié fin 2018 liste 11 sites d'observation astronomique, avec un rayon de 10 km dans lequel des mesures spécifiques devraient être prises. Depuis 2019, l'État et les collectivités concernées n'ont jamais indiqué s'ils le font appliquer réellement ou ni comment.

Un autre arrêté a été publié fin 2018, à la suite du recours associatif auprès du ministère de l'Écologie sans réponse, puis gagné devant le Conseil d'État. Il a permis d'ouvrir une consultation publique à laquelle nombre des correspondants locaux, relais et partenaires de l'ANPCEN ont ainsi pu prendre part. L'ANPCEN a été mobilisée plus de 9 mois pour suivre les différentes versions du texte et faire des relectures et propositions de rédaction, correspondant à ses recommandations historiques. L'ANPCEN a réuni également par une même déclaration publique de grands acteurs et réseaux nationaux tels que la LPO, la Fédération des Parcs naturels régionaux, Réserves naturelles de France et la Société astronomique de France. L'ANPCEN a réalisé pour la 1re fois un document commun avec l'Association des maires de France pour accentuer la pédagogie d'une nouvelle conception et de nouveaux usages des éclairages extérieurs, un guide de 16 pages destiné aux élus avec 40 questions-réponses.



Enfin, l'ANPCEN a publié un sondage inédit réalisé par OpinionWay pour l'association, permettant de montrer au gouvernement l'acceptation très large des Français de l'extinction en milieu de nuit des éclairages publics et privés.

Cet arrêté rappelle d'abord, à notre demande, les finalités : « Les émissions de lumière artificielle des installations d'éclairage extérieur et des éclairages intérieurs émis vers l'extérieur sont conçues de manière à prévenir, limiter et réduire les nuisances lumineuses, notamment les troubles excessifs aux personnes, à la faune, à la flore ou aux écosystèmes, entraînant un gaspillage énergétique ou empêchant l'observation du ciel nocturne. » En effet,

c'est à la faveur de cette pédagogie des effets que leur compréhension et les pratiques progressent.

Il promeut, comme l'ANPCEN le recommande depuis longtemps, une nouvelle conception des éclairages extérieurs et des évolutions d'usages par la gestion de la durée d'éclairement, avant même les dispositions techniques. La durée d'éclairement est en effet la première mesure à prendre, quasiment sans coûts publics, pour réduire la quantité de lumière émise la nuit, donc la pollution lumineuse associée, économiser budget public et énergie. Fixer des limites d'éclairement après cessation d'activités s'avère de simple bon sens. En revanche, le recul de l'État sur de mêmes mesures envers l'éclairage public (qui a pourtant enregistré 94 % d'augmentation de quantité de lumière émise en seulement 25 ans) est regrettable. Et ce d'autant plus que nombre de communes font déjà mieux que les dispositions de l'arrêté et que les Français comprennent de plus en plus l'utilité des extinctions aux heures creuses.

Ce texte a permis d'élargir les sources lumineuses concernées et prend le relais de l'arrêté obtenu en janvier 2013 abrogé, sur les éclairages dits non résidentiels : vitrines, façades et bureaux non occupés.

Il fixe certaines valeurs techniques (orientation, type de lumière, quantité de lumière émise...) pour la conception et le fonctionnement des installations d'éclairage extérieur destiné à favoriser la sécurité des déplacements sur l'espace public et privé, l'éclairage de mise en lumière du patrimoine, du cadre bâti ainsi que les parcs et jardins, l'éclairage des équipements sportifs de plein air ou découvrables, l'éclairage des bâtiments non résidentiels, recouvrant à la fois l'éclairage intérieur émis vers l'extérieur de ces bâtiments et l'éclairage des façades de bâtiments, l'éclairage des parcs de stationnement non couverts ou semi-couverts, l'éclairage événementiel, l'éclairage des chantiers en extérieur. Ces prescriptions varient selon l'implantation en agglomération, hors agglomération ou dans les espaces naturels ainsi que dans les sites d'observation astronomique listés. Il reste regrettable que certaines valeurs n'aient pas été visées d'emblée, notamment pour faciliter un contrôle visuel simple, et ce, alors que les collectivités ne modifieront pas plusieurs fois de suite leurs matériels actuels.

Des mesures spécifiques nécessaires seraient applicables dans les espaces naturels protégés, les parcs et jardins et dans le rayon des sites astronomique listés, afin de mieux tenir compte des effets d'éclairages dans des espaces riches en biodiversité et propices à l'observation du ciel nocturne. Des dispositions touffues, et qui entérinent parfois simplement des pratiques actuelles, devront être évaluées.

Les lumières intrusives, objet de nombreux courriers reçus par l'ANPCEN chaque semaine, trop peu prises en compte pour la qualité de vie et de sommeil des Français, figurent « Les installations d'éclairage ne doivent pas émettre de lumière intrusive excessive dans les logements quelle que soit la source de cette lumière ».

Globalement, l'ANPCEN regrette que les acteurs économiques qui ont largement contribué au sur-équipement et au sur-éclairage par leurs prescriptions depuis de nombreuses années ne se voient sujets d'aucune régulation, ni mis à contribution, selon le principe de droit pollueur-payeur pour faire évoluer la situation actuelle. Et regrette enfin qu'il n'ait pas été possible non plus de progresser par d'autres voies que la réglementation et un recours associatif. Des mesures complémentaires incitatives d'une autre nature sont toujours nécessaires, tel le label Villes et Villages étoilés valorisant des efforts engagés volontairement. La vigilance de l'ANPCEN porte notamment sur les mesures d'accompagnement public des communes et acteurs qui veulent progresser, sur la transformation de financements et dispositifs publics néfastes, sur l'encadrement et les engagements de progrès des acteurs de l'éclairage, sur le contrôle effectif de l'application de la réglementation par les autorités publiques qui en ont la responsabilité. L'arrêté entre progressivement en vigueur, jusqu'en 2025.

Des lettres-type ANPCEN ont été mises à disposition des citoyens pour sensibiliser les élus.

Autres textes de référence

L'ANPCEN continue ce travail de reconnaissance de la pollution lumineuse en la faisant prendre en compte dans nombre d'autres textes, tels des plans, stratégies, etc.

Les différents textes :
https://urlz.fr/ib70
Des lettres-type ANPCEN mises à disposition :
https://urlz.fr/ib74
Villes et Villages étoilés, un label national original :
https://urlz.fr/ib78

Association Nationale pour la Protection du Ciel et de l'Environnement Nocturnes
anpcen
PRÉSERVONS LA NUIT

TERRITOIRE DISTINGUÉ POUR LA PROTECTION
Territoire de Villes et Villages Étoilés
DU CIEL ET DE L'ENVIRONNEMENT NOCTURNES

Villes et Villages étoilés, un label national original

■

DARKSKYLAB, LES CHASSEURS DE POLLUTION LUMINEUSE

Sébastien Vauclair, astrophysicien, Christophe Plotard, géomaticien et Philippe Deverchère, ingénieur, de DarkSkyLab.

Fondé en 2014, ce bureau d'études toulousain est spécialisé dans l'étude de l'éclairage artificiel et de ses effets. Grâce à un outil de modélisation et de cartographie de la pollution lumineuse, il aide les décideurs publics et opérateurs privés à réduire la production de lumière, pour mieux protéger les hommes et la biodiversité, diminuer les consommations énergétiques, et rendre à la nuit son ciel étoilé.

Comment produit-on des tomates en France en hiver ? En les faisant pousser sous des serres chauffées et… éclairées la nuit. La puissance lumineuse de ces installations est telle qu'elle est aisément détectable sur les images satellites nocturnes et constitue une source de nuisances majeures pour la biodiversité, les riverains et les astronomes.

Le bureau d'études DarkSkyLab a participé à la mise en évidence de ce phénomène et a permis de quantifier ses impacts. Fondé à Toulouse en 2014 par Sébastien Vauclair et Michel Bonavitacola, puis rejoint ensuite par Philippe Deverchère qui a permis le développement de ses outils de simulation et de métrologie, DarkSkyLab est spécialisé en mesure, analyse, modélisation et cartographie de la pollution lumineuse. Le bureau d'études a notamment développé le moteur de simulation de la pollution lumineuse Otus, sans équivalent connu à ce jour dans le monde, et de Ninox, un système de mesure en continu de la luminance zénithale.

Simuler la brillance du ciel

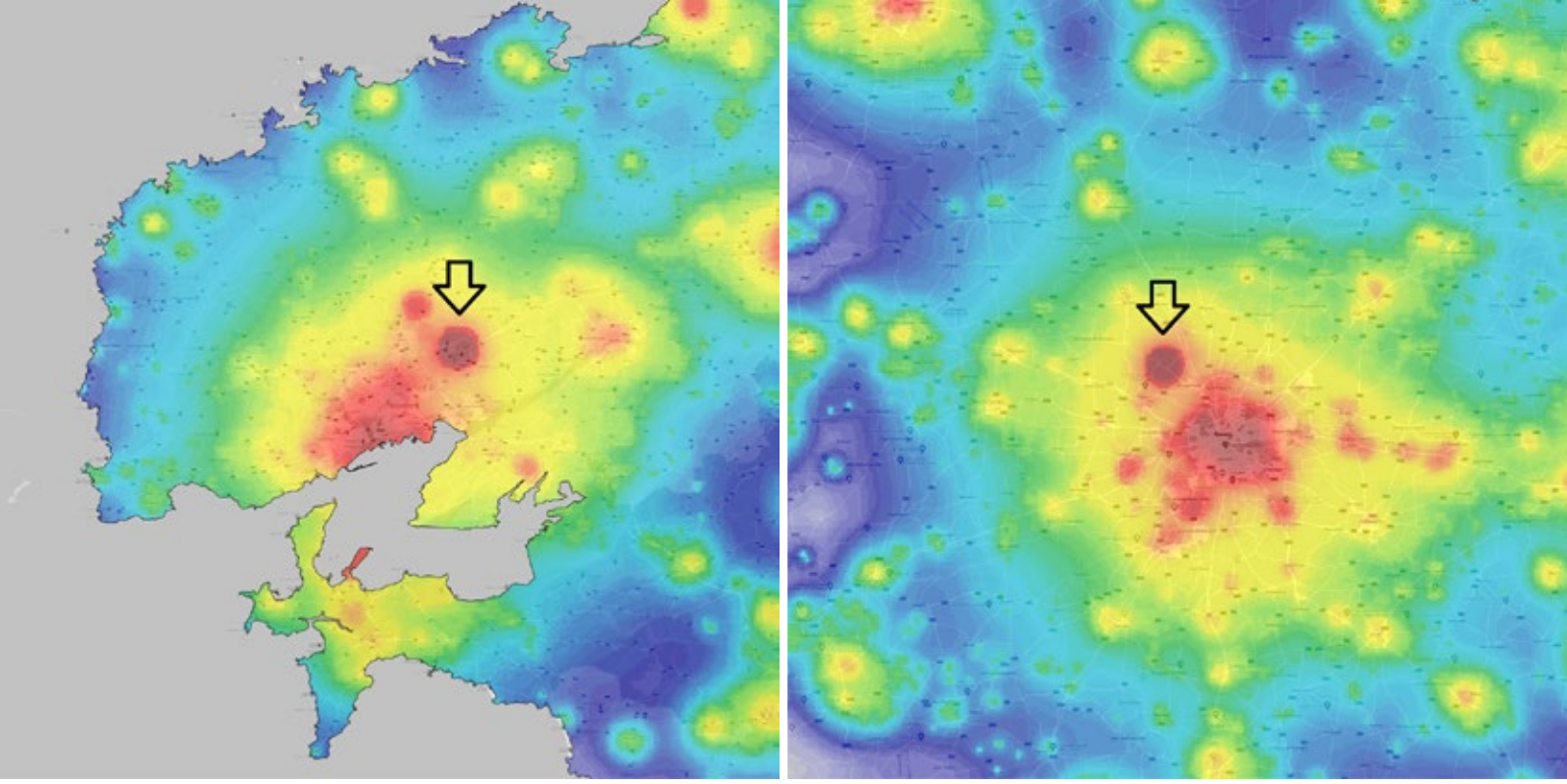
Les simulations de pollution lumineuse visent à représenter sous forme cartographique, en chaque point d'un territoire d'études, la brillance du fond de ciel nocturne au zénith, ou luminance zénithale, telle qu'elle serait perçue par un observateur au sol.
La lumière produite par l'éclairage public et industriel, et dans une moindre mesure par l'éclairage résidentiel privé, est diffusée par les molécules de gaz de l'atmosphère et par les aérosols en suspension. Cette diffusion est à l'origine de la formation de halos lumineux au-dessus des agglomérations, halos qui peuvent être visibles à de grandes distances.
Les simulations de pollution lumineuse sont donc réalisées en modélisant par ordinateur cette diffusion des flux lumineux provenant de multiples sources.
Exprimée en magnitudes par seconde d'arc au carré (mag/arcsec²), la luminance zénithale permet de définir la qualité d'un ciel : une valeur de 17 mag/arcsec² sera ainsi caractéristique d'un ciel très lumineux (centre d'une grande ville), alors qu'une valeur de 22 mag/arcsec² sera typique d'un ciel extrêmement sombre (lieu qui serait très éloigné de toute source de lumière).

Pour réaliser ces simulations et produire des cartes de pollution lumineuse, DarkSkyLab s'appuie sur diverses données permettant de localiser les sources de lumière et quantifier leurs émissions : des images satellites de nuit, des mesures réalisées sur le terrain, ou encore des bases de données de points d'éclairage public ou privé (comportant les caractéristiques techniques de chaque point telles que le type de lampe employé, la puissance lumineuse et la température de couleur de la lampe).

Dans le cas des serres à tomates éclairées artificiellement, les données satellites ont d'abord permis d'évaluer que certaines nuits d'hiver, le flux lumineux qu'elles produisent est jusqu'à 40 fois plus puissant que celui généré par un centre-ville. Ensuite, la simulation de pollution lumineuse a montré que la diffusion de la lumière artificielle à partir de ces installations avait le pouvoir de dégrader la qualité du ciel nocturne non pas seulement dans leurs environs immédiats, mais bien dans un rayon de plusieurs kilomètres voire dizaines de kilomètres autour d'elles.

Des «trames noires» pour la biodiversité

Quelles sont les applications d'un tel outil ? L'objectif général de DarkSkyLab est d'aider à la diminution de la pollution lumineuse et de ses impacts négatifs. Le bureau



Localisation de serres à tomates sous éclairage artificiel en périphérie de Brest (à gauche) et Rennes (à droite), grâce aux cartes de simulation de pollution lumineuse de DarkSkyLab. La couleur rouge foncé indique un niveau de pollution lumineuse extrêmement élevé.

d'études intervient donc pour réaliser des diagnostics de parcs d'éclairage, fournir des préconisations pour réduire ou supprimer certaines émissions de lumière, simuler des scénarios de modification de l'éclairage pour en prédire les bénéfices, évaluer la pollution lumineuse d'une future installation, etc.

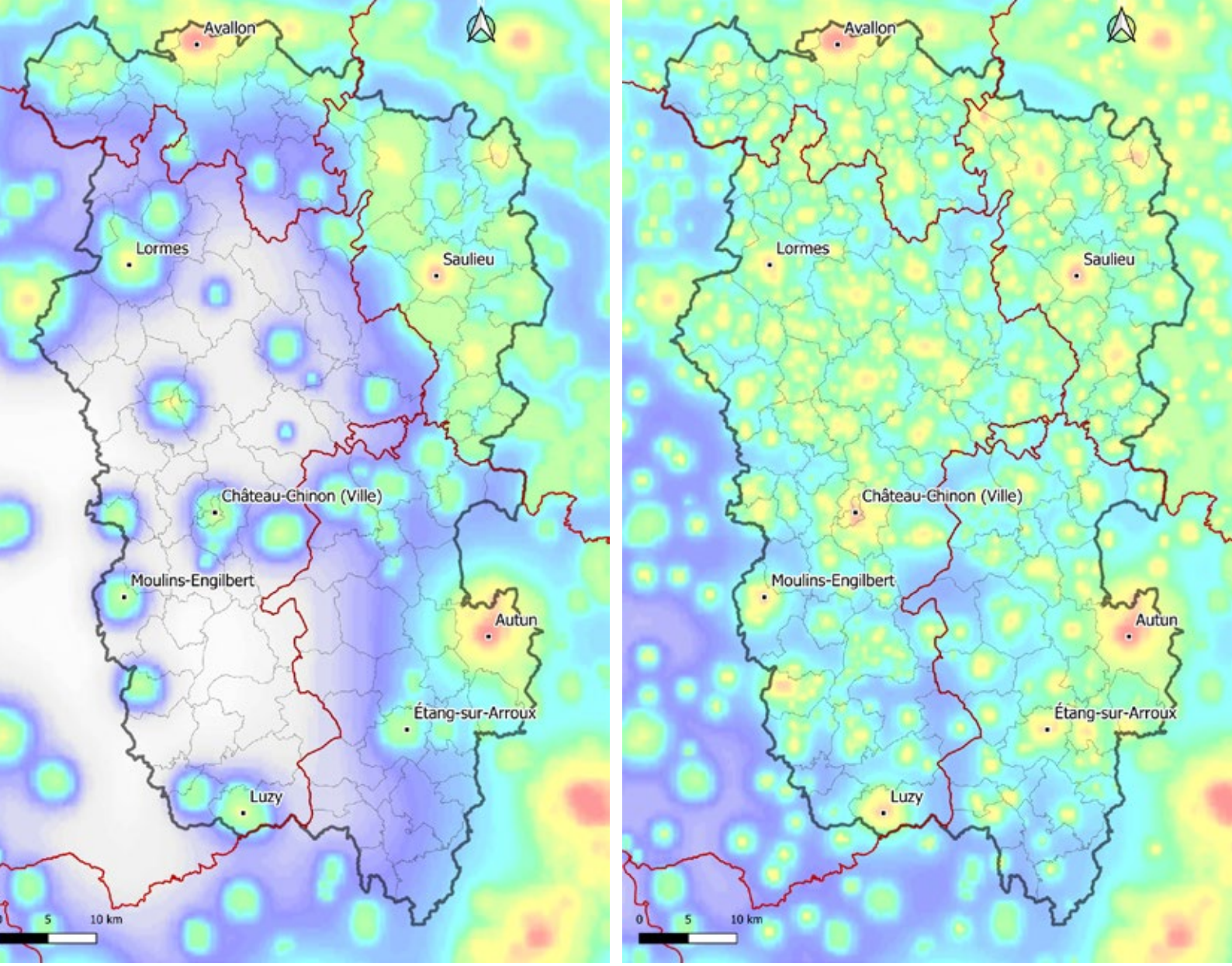
De manière concrète, la société est par exemple sollicitée par des collectivités locales désireuses de s'engager dans une démarche de « trame noire ». Il s'agit d'identifier les zones d'un territoire qui sont particulièrement importantes pour la vie et les déplacements des animaux nocturnes (chauve-souris, grenouilles, anguilles, etc.), et qui doivent donc bénéficier de la meilleure obscurité possible. La simulation de pollution lumineuse, croisée aux connaissances disponibles sur les espèces et leurs comportements, permet dans ce cas d'identifier précisément les espaces sombres qui doivent le rester, et surtout les espaces soumis à d'importants niveaux de lumière et où des actions de restauration de l'obscurité naturelle doivent être engagées en priorité.

Sur la base de ces informations, les communes sont alors encouragées à transformer tout ou partie de leur parc d'éclairage public (utiliser des lampes LED avec des températures de couleur basses, orienter davantage les flux lumineux vers le sol) et, mieux encore, à mettre en place des mesures de réduction de puissance ou d'extinction de l'éclairage, au minimum durant le cœur de la nuit (c'est-à-dire typiquement entre 23 h et 5 h du matin).

Éteindre les lumières pour rallumer la nuit

Dans l'immense majorité des cas, les pratiques d'extinction ne concernent que l'éclairage public, et pas les sources de lumière d'origine privée (commerces, industries, etc.). Mais l'effet en termes de pollution lumineuse peut déjà être spectaculaire, comme le montre la comparaison de cartes de simulation avec et sans extinction.
Dans le Parc naturel régional du Morvan, par exemple, les extinctions d'éclairage public la nuit dans un très grand nombre de communes permettent d'atteindre un niveau d'obscurité de qualité exceptionnelle en cœur de nuit. À l'inverse, en dehors des périodes d'extinction, c'est-à-dire en soirée et au petit matin (ce qu'on appelle les extrémités de nuit), la carte de pollution lumineuse montre que le ciel est beaucoup moins sombre, ce qui est typique de zones composées de petites villes, bourgs et villages ruraux.

Souhaitant pousser plus loin leur démarche, certains territoires s'engagent dans l'obtention du label de « Réserve internationale de ciel étoilé », qui récompense les espaces où l'obscurité nocturne est de grande qualité. DarkSkyLab est, là aussi, sollicité afin d'accompagner les territoires en phase de candidature puis dans leurs actions en vue de conserver le label à long terme. Le bureau d'études est ainsi appelé à fournir des diagnostics et des préconisations, mais aussi identifier la zone cœur de la réserve, simuler les améliorations potentielles en cas d'extinction complète de l'éclairage public sur l'intégralité du territoire candidat, ou suivre l'évolution de la pollution lumineuse année après année.



Comparaison de cartes de pollution lumineuse dans le Parc naturel régional du Morvan, en cœur de nuit (à gauche) et en extrémité de nuit (à droite). La couleur gris clair indique un niveau de pollution lumineuse extrêmement faible, la couleur verte indique un niveau de pollution lumineuse dit de « transition suburbain-rural ».

La lutte contre le sur-éclairage en ville

Mais le travail sur la pollution lumineuse n'est pas qu'une affaire de territoires ruraux ou d'espaces naturels. Il concerne également les territoires urbains, y compris les très grandes métropoles, qui cherchent elles aussi à réduire les impacts de la lumière sur leurs habitants, à protéger la biodiversité urbaine et à diminuer leur consommation énergétique. Ce sujet est même en train de devenir l'un des chantiers incontournables de nombreuses villes françaises.

DarkSkyLab vient par exemple de démarrer l'étude de la pollution lumineuse dans le cadre du nouveau marché public de l'éclairage de la ville de Paris. L'objectif de ce marché est notamment le renouvellement complet du parc d'éclairage de la capitale, qui devra permettre la restauration de zones de relative obscurité pour la biodiversité, ainsi que la réduction de la consommation électrique de 30 % par rapport à l'existant.

En novembre dernier, l'Observatoire national de la biodiversité a publié la première carte de la pollution lumineuse en France métropolitaine, réalisée là encore grâce à l'outil de simulation de DarkSkyLab sur la base d'images satellites[1]. Elle montre que 85 % du territoire hexagonal est soumis à un niveau élevé de nuisances induites par l'éclairage artificiel. Preuve que la chasse à la pollution lumineuse ne fait que commencer.

■

1 Carte visible sur https://www.ofb.gouv.fr/actualites/un-nouvel-indicateur-pour-mesurer-la-pollution-lumineuse.

AU SEIN DU CNRS, UN OBSERVATOIRE DE L'ENVIRONNEMENT NOCTURNE POUR ACCOMPAGNER LA TERRITORIALISATION DE LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION LUMINEUSE

Samuel Challéat[1], Kévin Barré[2], Dany Lapostolle[3], Johan Milian[4], Rémi Bénos[5], Hélène Foglar[6], Charles Ronzani[7], Nicolas Farrugia[8], Marion Maisonobe[9], Héloïse Prévost[10], Sylvain Morvan[11], Matthieu Renaud[12]

La pollution lumineuse, un problème environnemental de portée globale

Des implications énergétiques

Étroitement lié à l'urbanisation, l'éclairage extérieur a augmenté de 3 à 6 % par an au cours de la seconde moitié du XXe siècle, selon la zone du globe considérée. Aujourd'hui encore, nos usages de lumière artificielle nocturne (ALAN, pour *artificial light at night* – lumière artificielle nocturne) sont en augmentation dans la plupart des régions du monde. On observe ainsi, entre 2012 et 2016, une augmentation de 2,2 % par an de la surface terrestre artificiellement éclairée, une croissance totale de la radiance de 1,8 % par an et une augmentation de 2,2 % par an de la luminosité des zones éclairées en permanence. La pollution lumineuse touche à l'heure actuelle 23 % de la superficie des terres émergées du globe et 88 % de l'Europe continentale. Sous l'influence des aérosols plus ou moins naturellement présents dans l'atmosphère, ALAN se diffuse au-delà des zones urbanisées et marque de son empreinte les aires protégées et les « points chauds » de biodiversité. ALAN représente par ailleurs une part importante de la consommation énergétique mondiale, avec 20 % de la consommation mondiale d'électricité, 6 % des émissions de CO_2 et 3 % de la demande mondiale en pétrole.

ALAN = artificial light at night
= lumière artificielle nocturne

Rien qu'aux États-Unis, l'International Dark-sky Association (IDA) estime qu'au moins 30 % de tout l'éclairage extérieur est gaspillé. Toujours selon cette ONG, ce gaspillage coûte annuellement jusqu'à 3,3 milliards de dollars et émet, sur la même période, 21 millions de tonnes de dioxyde de carbone. Cette pression anthropique croissante contribue au changement environnemental global par de multiples mécanismes liés à la culture, à l'écologie et à la santé.

Des implications culturelles et sociales

En termes socioculturels et en érodant l'obscurité naturelle, ALAN ferme notre fenêtre sur le ciel étoilé – un tiers de l'humanité ne peut plus distinguer la Voie lactée – et, plus largement, réduit nos rapports expérientiels à l'obscurité, inépuisable ressource historique, littéraire, philosophique, religieuse, paysagère ou artistique. ALAN participe ainsi de l'extinction de l'expérience de nature et alimente une amnésie environnementale générationnelle et un syndrome de perte de référence. En outre, les études de géographie culturelle soulignent à quel point l'obscurité rend possible des formes originales de convivialité, d'intimité et d'occupation des espaces publics, ainsi que la perception de l'environnement par des sens autres que la vue. En d'autres termes et quel que soit le type d'espace concerné, la préservation de l'obscurité donne accès à un ensemble d'expériences permettant l'appréhension multisensorielle du monde.

1 Chargé de recherche au CNRS (UMR GÉODE, Toulouse), géographie de l'environnement.
2 Chercheur contractuel au MNHN (UMR CESCO, Concarneau), écologie de la conservation.
3 Maître de conférences à l'Université de Bourgogne Franche Comté (UMR ThéMA, Dijon), aménagement de l'espace et urbanisme.
4 Maître de conférences à l'Université Paris 8 (UMR LADYSS, Paris), géographie de l'environnement.
5 Maître de conférences à l'INU Champollion d'Albi (UMR GÉODE, Toulouse), géographie de l'environnement.
6 Ingénieure écologue indépendante, éducatrice à l'environnement et au développement durable, gérante du bureau d'études Athena-Lum.
7 Paysagiste DPLG indépendant, gérant du bureau d'études Poesis Paysages.
8 Maître de conférences à IMT Atlantique (UMR Lab-STICC, Brest), intelligence artificielle & apprentissage machine.
9 Chargée de recherche au CNRS (UMR Géographie-cités, Paris), géographie.
10 Chercheuse contractuelle à l'IRD (UMR CESSMA, Paris), sociologie de l'environnement.
11 Ingénieur d'études au CNRS (UMR GÉODE, Toulouse), instrumentation & mesure physique.
12 Chargé de recherche au CNRS (UMR LUPM, Montpellier), astrophysique des hautes énergies.

Des implications écologiques

Si la lumière artificielle nocturne produit de nombreux effets sur l'environnement, elle reste pourtant l'une des perturbations les moins bien comprises parmi celles affectant la biodiversité. En altérant les schémas naturels de distribution entre lumière et obscurité dans les écosystèmes, ALAN affecte un large éventail d'espèces. Son influence sur le vivant s'étend du niveau moléculaire à celui des écosystèmes, et comprend donc également les interactions entre espèces et les processus de régulation. Le métabolisme énergétique des taxons et plus précisément leur dépense énergétique s'en trouve modifiée. Cette conséquence physiologique peut avoir un effet négatif à long terme sur la valeur sélective des individus des différentes populations.

La lumière artificielle nocturne fragmente également les habitats, altérant la connectivité fonctionnelle du paysage pour de nombreuses espèces. Cependant, les mécanismes d'évitement et d'attraction aux échelles locales varient selon les caractéristiques des espèces (par exemple, on observe chez les chauves-souris des différences de sensibilité entre les espèces à vol rapide et les espèces à vol lent) et les paramètres lumineux (par exemple l'intensité ou le spectre). Cette fragmentation due à la lumière artificielle a des implications génétiques. Sur le temps long de l'évolution des espèces, ce phénomène contribue à la différenciation des populations entre paysages urbains et ruraux. Il a par ailleurs été montré que la lumière artificielle nocturne représente une menace équivalente à l'artificialisation des sols ou à l'agriculture intensive. *In fine*, les perturbations d'ALAN sur les habitats et les espèces pourraient affecter profondément la dynamique de fonctionnement des populations, des communautés et des écosystèmes dans leur ensemble.

Des implications sanitaires

Du point de vue sanitaire, l'alternance naturelle entre lumière et obscurité est le synchroniseur exogène le plus puissant de l'horloge maîtresse des horloges périphériques. Cette horloge centrale contrôle tous les rythmes biologiques circadiens, tant pour l'homme que pour la faune et la flore. La dégradation de l'obscurité par ALAN perturbe la synchronisation de l'horloge circadienne centrale, modifie l'architecture du sommeil et inhibe la sécrétion de mélatonine. Ces réactions dépendent de plusieurs facteurs en interaction : l'intensité, la durée, le moment, les schémas temporels et la composition spectrale du stimulus lumineux. Des intensités de lumière artificielle nocturne comprises entre 2 et 10 lux photopiques suffisent ainsi à inhiber la sécrétion de mélatonine et à perturber l'horloge circadienne chez l'homme. Ces intensités sont très inférieures à celles auxquelles nous sommes exposés quotidiennement via nos multiples systèmes d'éclairage domestique et sont comparables à celles générées par la lumière intrusive dans une chambre à coucher sans volets en contexte urbain. Les conséquences d'une mauvaise synchronisation de l'horloge biologique sont nombreuses, et le rapport de l'ANSES de mai 2019 liste plus de 80 perturbations plus ou moins directement liées à ALAN, depuis les troubles du sommeil jusqu'à certains types de cancers en passant par l'obésité et le diabète.

Mais un problème traité de façon partielle

Le détour par la préservation du ciel étoilé, une réponse incomplète et utilitariste

Au niveau mondial, la lutte contre la pollution lumineuse se décline dans différentes modalités d'action portées par différents acteurs. Dans sa forme territoriale la plus aboutie, elle se traduit dans la mise en protection du ciel étoilé à travers de nouveaux zonages construits sur la logique 'classique' centre-périphérie : une zone centrale de haute protection est entourée d'une zone tampon, mais aucune protection environnementale n'est prévue à l'extérieur. Cette logique, qui a historiquement prévalu dans la planification de nombreux parcs nationaux, est celle actuellement utilisée pour mettre en place des « international dark sky places » (IDSP[1]) à travers le monde. Initiée en 1993 aux États-Unis avec la création de la Réserve de ciel étoilé du Lac Hudson (Michigan), cette dynamique territoriale prend véritablement son essor à la fin des années 2000. Elle repose sur une logique de zonage – labellisé – de protection du ciel étoilé, soutenue par différentes associations du « Dark sky movement », et notamment l'IDA. Plus de 150 territoires sont actuellement labellisés par cette dernière. Si ces labels ont initialement permis la distinction de haut-lieux de l'observation astronomique, ils sont aujourd'hui recherchés par les aires protégées « conventionnelles » – au sens de la typologie de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) – qui étendent ainsi le champ d'application de leurs mesures de protection au ciel étoilé.

Le principal critère de distinction est ici la possibilité d'accéder à un ciel étoilé exceptionnel. Ce critère est facilement mobilisable dans de multiples stratégies de valorisation, mais le développement du « tourisme de ciel noir » et autres stratégies de marketing territorial peuvent alors conduire à une considération purement

1 Voir https://www.darksky.org/our-work/conservation/idsp/

utilitariste du ciel étoilé en tant que nouveau bien économique aux bénéfices monétairement quantifiables. Ce « détour marchand » ne serait en soi pas problématique s'il n'obérait pas certaines dimensions fondamentales de la qualité de l'environnement nocturne. Ces démarches de labellisation nourrissent en effet une forme de mise en concurrence des territoires dans laquelle les critères et considérations esthétiques ou utilitaristes occultent quasi systématiquement les enjeux écologiques et sanitaires de la préservation de l'obscurité. Ainsi et si les IDSP et autres formes de zonages de préservation de l'obscurité reflètent le volontarisme de certains territoires dans la lutte contre la pollution lumineuse, la logique d'exceptionnalité du ciel étoilé sur laquelle ils se fondent reste insuffisante à la construction d'une approche globale de lutte contre la pollution lumineuse. En l'état, ces démarches restent cantonnées à quelques territoires de protection forte de l'environnement, richement dotés en ingénierie de soutenabilité. Leur diffusion aux territoires ordinaires suppose un renouvellement du répertoire d'action publique de la préservation de l'environnement nocturne .

Approfondir et étendre la préservation en direction de « l'obscurité ordinaire »

L'inscription de la préservation de la qualité de l'environnement nocturne dans les pratiques ordinaires d'aménagement et de développement de tous les territoires nécessite un approfondissement et une extension de la lutte contre la pollution lumineuse. Il ne s'agit en effet plus seulement de protéger le ciel étoilé de quelques territoires remarquables, relativement épargnés par la pollution lumineuse, mais bien de protéger la biodiversité ordinaire. L'enjeu est de préserver ce que nous appelons, par analogie, « l'obscurité ordinaire », celle qui n'est pas couverte par un dispositif de protection spécifique. *Approfondir* la lutte contre la pollution lumineuse, c'est donc diversifier les objets de la protection en passant du ciel étoilé à la biodiversité (enjeux écologiques) et à la qualité du cadre de vie (enjeux sanitaires). *Étendre* la lutte contre la pollution lumineuse, c'est diffuser la préservation de l'environnement nocturne en-dehors des seules aires protégées, jusque dans les « territoires ordinaires » – qu'ils soient ruraux, périurbains ou urbains. Saisir ce double impératif écologique/sanitaire et géographique est l'objectif du concept de « réseau écologique sombre » qui vise à faire de la protection de l'indissociable couple obscurité-biodiversité un nouveau principe directeur de l'aménagement des territoires.

Qu'est-ce qui se trame dans le noir ?

Le concept de réseau écologique vise à saisir les conditions écologiques nécessaires au maintien des individus et des populations dans un habitat fragmenté, par exemple en maintenant une diversité, une taille, une forme et une connexion suffisantes des zones d'habitat favorables selon les espèces ou les communautés considérées. C'est en s'appuyant sur ce cadre d'analyse que nous avons introduit dans le débat scientifique international le concept de « réseau écologique sombre ». En soulignant l'importance de l'obscurité comme nouvelle dimension de la connectivité écologique, ce concept offre une double perspective pour une préservation intégrée de l'environnement nocturne : lutter contre l'homogénéisation et la fragmentation des habitats d'une part, et insérer les théories de la conservation dans les pratiques d'aménagement d'autre part.

Pourtant, il est vain d'espérer transcrire mécaniquement le concept de réseau écologique sombre en une « trame noire » telle que la doctrine planificatrice techno structurelle la conçoit actuellement. En pratique, les spécificités des espèces font qu'il faudrait concevoir autant de « trames noires » que d'espèces vivantes, si bien que la modélisation d'une trame noire généraliste relève au mieux de l'illusion, au pire de la supercherie. Plutôt qu'une hypothétique « trame noire » correspondant à une mise en ordre du vivant suivant des infrastructures dédiées, la traduction du concept de réseau écologique sombre dans l'action conduit donc à considérer en premier lieu la trame éclairée – matérialité construite, tangible, sur laquelle il est rationnellement possible d'intervenir dans les zones à enjeux socio-écologiques afin de rééquilibrer besoins humains de lumière et besoins humains et non humains d'obscurité. Mais émerge alors un impératif, qui constitue actuellement le cœur du problème lors de tout projet d'aménagement visant à reconquérir l'obscurité ordinaire : se placer en capacité de penser *conjointement* les multiples enjeux du couple lumière/obscurité. La mise en œuvre de l'Observatoire de l'environnement nocturne vise à répondre à cet impératif en se positionnant à l'interface entre sciences de la société, sciences du territoire, sciences du vivant et de la conservation et sciences de l'Univers pour se donner les moyens de « socialiser les pixels » de la pollution lumineuse.

L'Observatoire de l'environnement nocturne

Mobiliser un objet de recherche permettant l'interdisciplinarité

Pour mieux saisir les problèmes inédits posés par les antagonismes entre besoins humains de lumière artificielle et besoins humains et non humains d'obscurité, nous mobilisons un objet de recherche qui traverse les disciplines pour leur propre approfondissement : l'environnement nocturne. En l'inscrivant dans le cadre d'analyse holistique des systèmes socio-écologiques, nous faisons de l'environnement nocturne un objet apte à structurer une interdisciplinarité permettant de saisir les besoins de lumière artificielle nécessaires à la continuité des usages humains de l'espace, et les besoins d'obscurité nécessaires au fonctionnement du vivant et à l'hygiène sanitaire des populations humaines. Par exemple, appréhender la « qualité de l'environnement nocturne », c'est tout autant questionner la « qualité des ambiances lumineuses » perçues et vécues en un lieu que questionner la « qualité écologique » d'un milieu plongé dans une obscurité plus ou moins dense. Plus encore, c'est ouvrir l'analyse de l'environnement nocturne à d'autres formes de dégradations environnementales touchant l'espace-temps nocturne, au premier rang desquelles nous plaçons la question de la pollution sonore.

Répondre au besoin de connaissances situées et orientées vers l'action publique et collective

Le cadre de travail adopté au sein de l'Observatoire pour l'étude des socio-écosystèmes nocturnes permet l'analyse du sens des lieux et des relations aux espaces vécus en les considérant comme des aspects qui doivent être pris en compte dans la définition des instruments de préservation de la qualité environnementale nocturne. Faire de la préservation de l'environnement nocturne une préoccupation de l'aménagement de l'espace oblige à de nouveaux arbitrages pour concilier enjeux techniques, socioculturels et environnementaux de l'éclairage artificiel nocturne. Parce qu'elle met en tension des lectures différentes du cadre de vie, qu'elle questionne nos référentiels d'usage et d'attitude consuméristes et qu'elle amène à faire évoluer les façons de faire, la préservation de l'environnement nocturne doit être posée comme objet de débat et enjeu de société. En conséquence, elle nécessite d'être appropriée, débattue dans des arènes ouvertes à des publics pluriels pour produire une réelle expertise d'usage et ainsi pondérer les approches planificatrices portées par les sphères d'action descendantes, tant celles de l'éclairagisme que celles du protectionnisme.

Accompagner la territorialisation de la préservation de l'environnement nocturne

L'échelle locale apparaît ici pertinente pour mettre l'action collective de préservation de l'environnement nocturne en adéquation avec les systèmes de valeurs et de représentations liés à l'épaisseur physique, écologique, historique, socio-économique, politique et symbolique des territoires. Cette mise en adéquation est l'enjeu de la territorialisation, pratique qui vise à faire entrer les outils, méthodes et connaissances scientifiques en société. Elle consiste à former des publics capables de définir des problèmes, participer à l'enquête, à la collecte de données, être inclus dans les protocoles d'analyse pour, *in fine*, participer à la proposition de solutions. C'est précisément ce besoin de situer les connaissances et leur traduction opérationnelle au plus près des enjeux d'aménagement qui rend pertinente la démarche transdisciplinaire mobilisée au sein de l'Observatoire de l'environnement nocturne. Celle-ci permet d'une part de réduire la distance entre disciplines autour d'un objet grâce à l'interdisciplinarité. D'autre part, elle réduit les distances spatiale, temporelle, sociale ou encore institutionnelle entre l'énonciation d'un problème et son traitement, du fait de la participation d'autres acteurs sociaux que les chercheurs au protocole d'enquête (voir l'encart). Aussi cette démarche nous permet-elle de caractériser les socio-écosystèmes nocturnes à échelle fine (à l'échelle du paysage pour l'écologue, à l'échelle de l'espace vécu pour le géographe, à l'échelle des perceptions pour l'habitant-observateur) et dans leurs multiples dimensions, nous permettant ainsi de mieux comprendre les besoins humains de lumière artificielle et les besoins humains et non humains d'obscurité qui s'expriment en leur sein.

Un Observatoire pour refonder la gouvernance de l'environnement nocturne

De la gestion d'un système technique à la gouvernance d'un bien commun

Pour que sa territorialisation s'opère convenablement, les outils de la préservation de l'environnement nocturne doivent se faire les véhicules de la socialisation de la lutte contre la pollution lumineuse, et non les véhicules de sa « confiscation cognitive » par la technicisation du problème. La confiscation cognitive se rencontre dans les démarches expertes, techniques et standardisées qui ciblent davantage les dimensions (bio)physiques de la pression lumineuse et des territoires que les populations et leurs diversités d'usages, et placent ces derniers à distance de toute capacité de décision. Pour éviter cet écueil, il est nécessaire de prendre en compte les effets d'apprentissage issus des difficultés rencontrées dans la mise en œuvre d'autres politiques publiques environnementales. Les enseignements tirés de la mise en œuvre de la politique Trame verte et bleue, par exemple, sont ici précieux, notamment pour combler le fossé entre connaissance scientifique et action et pour approfondir les liens entre gouvernance multi-niveaux et processus participatifs. L'enjeu est de taille : il s'agit de dépasser peu à peu la *gestion technique* d'un *système technique* – l'éclairage urbain – pour se diriger vers la *gouvernance partagée* d'un *bien commun* – l'obscurité.

Liée aux problématiques du changement environnemental global et de la préservation de l'environnement, la notion de bien commun met en exergue la question de la gestion collective des ressources et fait entrer de nouveaux acteurs dans l'arène. Elle permet de prendre en compte, dans le développement territorial, l'ensemble des usagers de la ressource obscurité, qu'ils soient humains ou non-humains. Aborder l'obscurité comme bien commun oblige ainsi à remettre sur l'ouvrage les modalités de gestion de cette ressource territoriale et les formes de coordinations entre acteurs impliqués dans cette gestion. Parce qu'elle entraînera nécessairement des modifications profondes du cadre de vie, la territorialisation de la préservation de l'environnement nocturne est un projet de société qui doit être débattu dans des arènes ouvertes à des publics pluriels. Elle questionne donc les modalités de la gouvernance du système territorial qui érige l'obscurité en ressource pour les emmener vers des formes plus collaboratives mettant l'accent sur la résilience des systèmes, l'autonomisation et l'accès à la connaissance des acteurs. C'est l'enjeu de la transdisciplinarité d'établir des liens entre systèmes de connaissances et d'action à différentes échelles.

En pratique : la transdisciplinarité pour pluraliser les voix et activer les multiples valeurs de la ressource obscurité

La transdisciplinarité combine interdisciplinarité et participation. Elle rassemble chercheurs, habitants, responsables politiques, praticiens, collectifs d'usagers, associations environnementales, ou encore experts pour produire de la connaissance sur les phénomènes et résoudre des problèmes situés. Elle a donc une double vocation de produire des connaissances générales pour les articuler à l'action située. On la retrouve couramment dans des programmes de recherche participative et/ou de science citoyenne – à la condition que ceux-ci ne se cantonnent pas à l'extractivisme de données à bas coûts et dépassent la seule mobilisation des 'amateurs-experts'. Pour nous, la transdisciplinarité est un véhicule privilégié pour faire entrer les sciences en démocratie, casser les séparations disciplinaires et les séparations entre science et action, et ainsi poser les conditions de la bifurcation des trajectoires d'aménagement et de développement des territoires sous contrainte écologique forte (voir l'encart).

Encart

La transdisciplinarité pour accompagner l'action territoriale en matière de préservation de l'environnement nocturne

Soumise à une importante poussée démographique, l'île de La Réunion a vu sa population urbaine fortement augmenter – passant de 44 % de la population totale en 1975 à 95 % en 2015. Directement corrélée aux formes et dynamiques spatiales de l'urbanisation, l'empreinte lumineuse sur l'île a connu une mutation radicale ces dernières années (figure 1) : son emprise et sa pression ont considérablement augmenté sur l'ensemble du territoire, depuis la côte jusqu'à l'intérieur même du Parc national de La Réunion qui recouvre plus de 76 % du territoire insulaire (42 % pour la zone cœur). Acteur incontournable des enjeux environnementaux sur l'île, le Parc national a mené très tôt des actions autour des effets écologiques de l'éclairage artificiel nocturne. Sa mobilisation depuis plus de dix ans sur les conséquences de la pollution lumineuse sur l'avifaune endémique – et notamment sur des espèces phares comme le Pétrel de Barau (Pterodroma baraui) – a progressivement institutionnalisé un événement dont la portée de mobilisation se déploie désormais à l'échelle insulaire. L'organisation des *Nuits sans Lumière* a constitué de ce point de vue une réussite avec la

participation de nombreux acteurs associatifs à cet événement et l'implication d'une proportion importante de collectivités territoriales. Le caractère désormais incontournable dans l'agenda local de cet événement s'apprécie notamment à travers la diffusion de la pratique d'extinction de l'éclairage public opéré désormais par 19 des 24 communes de l'île pendant une période de 25 jours.

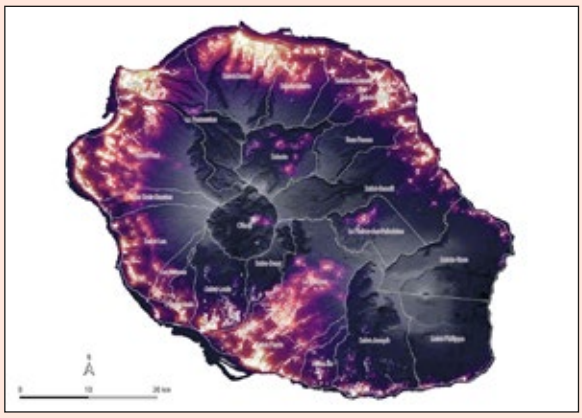


Fig.1. *Soumise à une importante poussée démographique, l'île de La Réunion a vu fortement croître sa population urbaine (de 44 % du total en 1975 à 95 % en 2015). Directement corrélée aux formes et dynamiques spatiales de l'urbanisation, l'empreinte lumineuse sur l'île a connu une mutation radicale ces dernières années : son emprise et sa pression ont considérablement augmenté sur l'ensemble du territoire, depuis la côte jusqu'au cœur du Parc national qui couvre 42 % de l'île. Données : MNT BD_Alti IGN, VIIRS-DMSP composite novembre 2021, 2018 Land cover map (Pleiades) 0.5m (CIRAD).*
Réalisation Samuel Challéat, CNRS, Observatoire de l'environnement nocturne, pour le Parc national de La Réunion.

Le Parc a toutefois conscience de la nécessité de franchir un palier : en dépit de son succès médiatique, la démarche des *Nuits sans lumière* est demeurée circonscrite à une approche principalement écocentrée et a entraîné un certain essoufflement au niveau des publics et des partenaires. Comme dans d'autres territoires, la construction médiatique d'une 'nuit magnifiée' dans les espaces patrimonialisés du cœur de l'île participe d'un processus tendant à banaliser la dégradation de l'obscurité sur le reste du territoire. Acteur fédérateur, le Parc réfléchit aux conditions et outils nécessaires pour permettre le passage d'une action certes au fort retentissement médiatique mais qui reste "isolée", à une démarche plus structurante, transversale et pérenne lui permettant d'élargir et d'approfondir le répertoire d'action publique mobilisable autour des enjeux environnementaux de la lumière artificielle nocturne. L'organisation d'*Ateliers territoriaux Transition Écologique & Lumière* en novembre 2019 a constitué une étape décisive dans ce processus, ouvrant un véritable forum sur le sujet. Ces ateliers ont révélé un contexte de portage institutionnel favorable, souligné par l'implication de plusieurs communes urbaines en matière de réflexion sur leur parc d'éclairage public (La Possession, Saint-Denis). Le lancement d'un outil programmatique doté d'une ingénierie propre, le *Plan Transition Écologique & Lumière*, est un autre signe du volontarisme du Parc, de la dimension insulaire globale que prend cette problématique et de la volonté d'y arrimer des enjeux sociaux. Le basculement d'une démarche événementielle, les *Nuits sans lumière*, vers une démarche plus territoriale et transversale, celle des *Jours de la Nuit*, en constitue un autre signe. Pour socialiser sa démarche justement, le Parc souhaite faire évoluer sa stratégie de lutte contre la pollution lumineuse pour l'emmener vers la préservation de l'environnement nocturne et ainsi l'ouvrir aux enjeux sanitaires de l'obscurité (appréhendée par les notions de bien-être et de qualité du cadre de vie) et aux dimensions socioculturelles des rapports à la nuit et à l'obscurité, notamment en s'appuyant sur la richesse du 'fait obscur' – le fénoir de la culture créole.
Pour l'accompagner dans ses réflexions transversales, le Parc national de La Réunion a sollicité l'Observatoire de l'environnement nocturne dans la perspective d'élaborer un programme de recherche interventionnelle pluriannuel. Ainsi et depuis 2021, le programme-cadre FENOIR (Figurations de l'environnement nocturne des territoires réunionnais) permet le déploiement simultané de plusieurs opérations de recherche impliquant des publics variés – habitants, collectifs d'usagers, responsables politiques, agents du Parc national et praticiens de la préservation de l'environnement, associations environnementales ou encore associations d'astronomie. Ces opérations consistent, de façon non exhaustive, en l'installation d'un réseau de capteurs pour le suivi long terme de la pression lumineuse sur l'île, l'installation d'ateliers participatifs visant à comprendre et analyser les rapports expérientiels à l'environnement nocturne dans plusieurs quartiers de franges urbaines, le déploiement de protocoles expérimentaux en écologie des paysages ou encore en un programme pluriannuel de formation-action des agents du Parc national aux enjeux pluriels de la préservation de l'obscurité (figure 2).



Atelier habitants dans le quartier du Brûlé (commune de Saint-Denis).



Parcours commenté nocturne avec des habitants de La Plaine des Palmistes.



Installation d'un photomètre TESS-W à l'Observatoire astronomique des Makes dans le cadre du déploiement d'un réseau de capteurs pour le suivi long terme de la pression lumineuse sur l'île.



Enregistreur bioacoustique installé dans la commune de Saint-Joseph lors d'une expérimentation visant à étudier les effets de l'extinction de l'éclairage public sur l'utilisation des paysages par les chiroptères.

Fig.2. *L'interdisciplinarité et la participation sont au fondement des démarches de recherche et de recherche interventionnelle déployées par les chercheurs de l'Observatoire de l'environnement nocturne pour un rapprochement des expertises scientifiques, techniques et d'usage, ici dans le cadre du programme pluriannuel FENOIR, à La Réunion. Photographies : Samuel Challéat, CNRS, Observatoire de l'environnement nocturne, pour le Parc national de La Réunion.*

Quelle posture de recherche-action au sein de l'Observatoire ?

Positionner l'Observatoire de l'environnement nocturne en dispositif scientifique d'accompagnement de la fabrique des politiques locales consacrées à l'environnement nocturne n'est pas neutre quant à la posture de recherche associée. Nous soutenons que l'écologisation des politiques d'aménagement en général et d'éclairage public en particulier passe par un rapprochement des expertises scientifiques, techniques et d'usage. La posture scientifique des membres de l'Observatoire de l'environnement nocturne est donc à la fois critique et propositionnelle. Elle ne se satisfait pas d'une logique linéaire de division des temps, des lieux, des acteurs de la connaissance, de ceux de l'action et de la décision. Elle propose une démarche qui s'inscrit dans le processus cumulatif des sciences tout en proposant des solutions contextualisées. Aussi suggérons-nous de faire atterrir les outils de la préservation de l'environnement nocturne pour en faire des opérateurs territoriaux de transition posant que la séparation classique entre savoir expert et savoir profane est rendue inopérante face à des problèmes inédits, peu standardisables en raison de leur caractère multiscalaire et néanmoins situé. L'opérateur territorial de transition contribue alors à décrire la réalité en croisant des savoirs académiques, vernaculaires, des expériences de vie. Il soutient que la bonne décision n'est pas uniquement celle des experts, mais celle qui s'enrichit de l'expertise du quotidien des personnes concernées. L'écologisation des politiques d'aménagement suppose donc de socialiser la démarche scientifique, car définir les conditions d'habitabilité des territoires-milieux de vie ne saurait se satisfaire du seul « éclairage » technico-scientifique. Nos travaux aux côtés des territoires invitent donc à inoculer de la convivialité dans une démarche scientifique de proximité, à échelle fine et qui favorise le partage des savoirs et la construction du concernement, sans pour autant renoncer à sa prétention universalisante ni céder à « l'antiscience ».

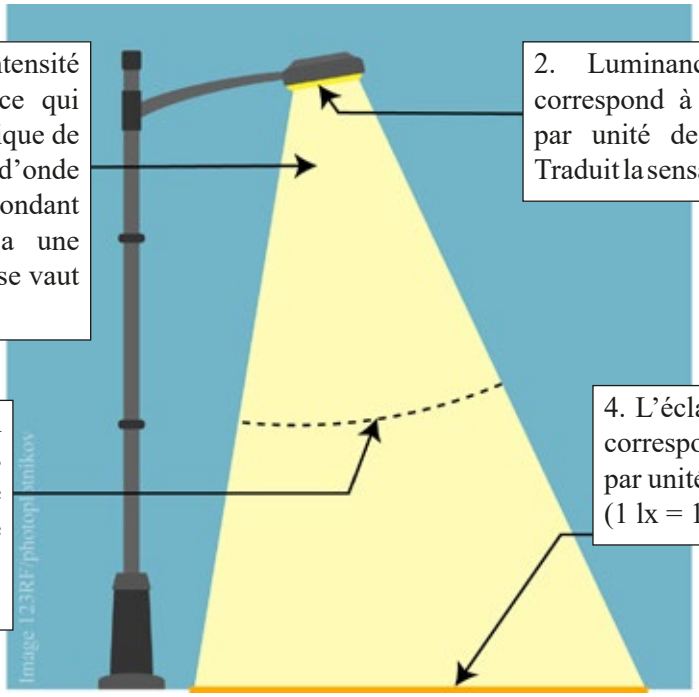
■

Les unités d'éclairement

Candela, lumen, lux, bougie, comment s'y retrouver dans ces différentes unités ?
Cette infographie devrait vous aider à mieux les comprendre...

1. La candela est l'unité d'intensité lumineuse définie ainsi : une source qui émet un rayonnement monochro- matique de fréquence 540 ×1012 Hz (longueur d'onde de 555 nm dans le jaune vert correspondant à l'efficacité visuelle maximale) a une intensité de 1 candela si l'énergie émise vaut 1/683 watt par stéradian.

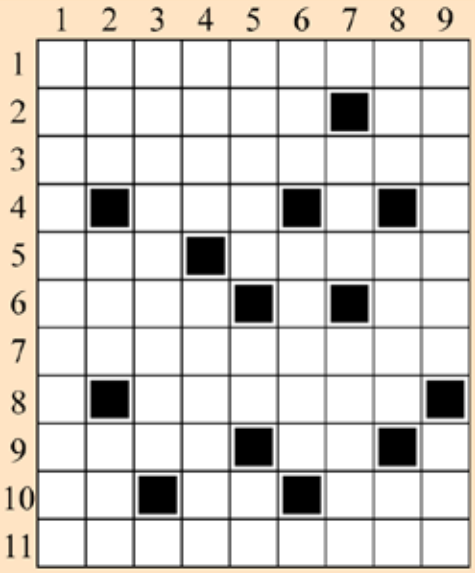
2. Luminance L en (cd.m-2) correspond à l'intensité lumineuse par unité de surface d'émission. Traduit la sensation d'éblouissement.



3. Flux lumineux F en lumen (lm) correspond à la somme des intensités. Exprime la quantité de lumière émise par l'ensemble du faisceau lumineux.
(1 lm = 1 cd.sr)

4. L'éclairement E en lux (lx) correspond au flux lumineux par unité de surface réceptrice.
(1 lx = 1 cd.sr.m-2).

La candela a été introduite en 1948 pour remplacer la bougie, ancienne unité d'intensité lumineuse mal définie.



Mots croisés : le ciel noir

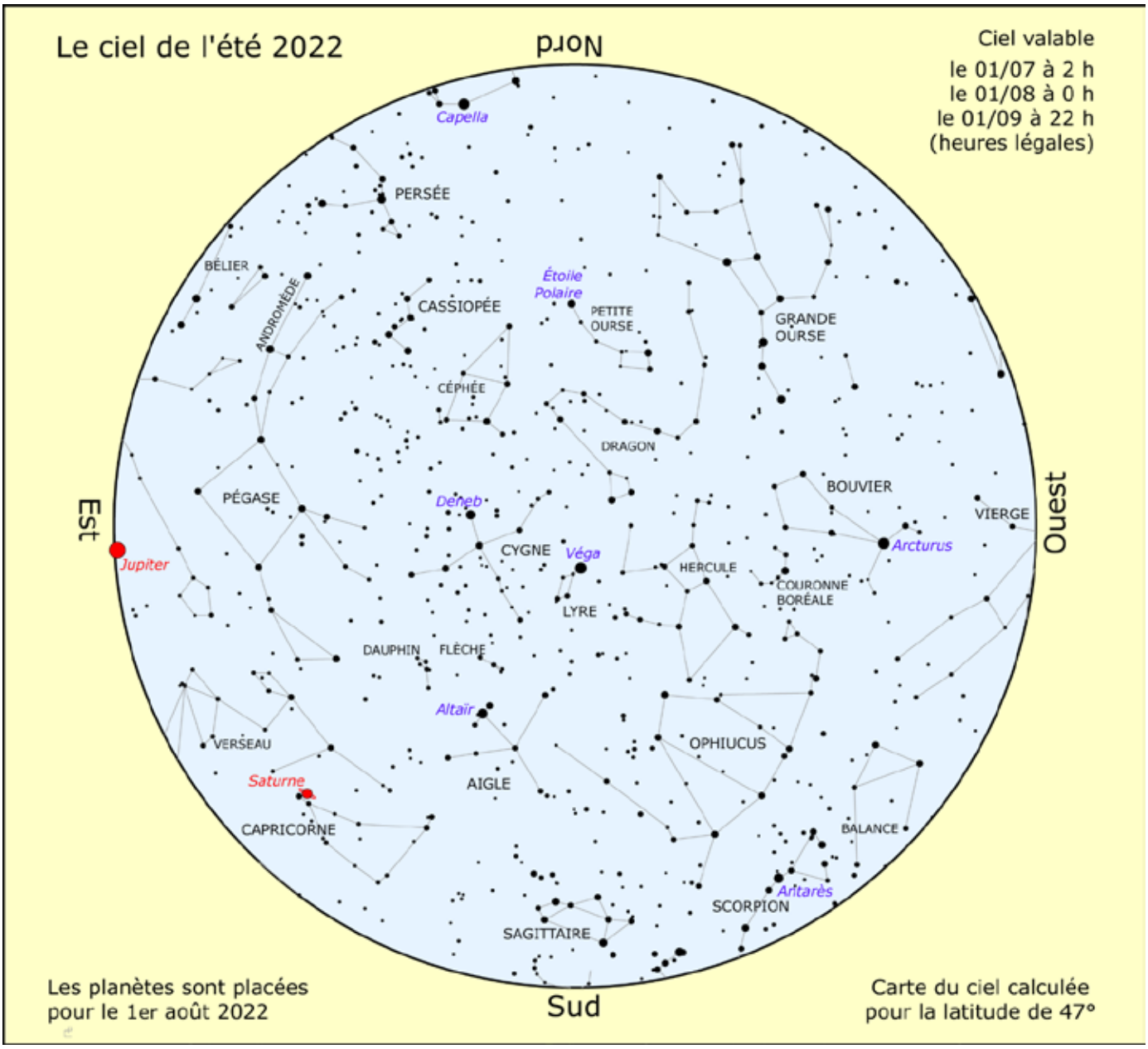
Horizontalement

1. Cette pollution est aussi gênante pour la faune et la flore.
2. Amis de l'Équateur. Nombre de satellites naturels de la Terre.
3. Elle peut dépasser 6 à l'œil nu par une nuit bien noire.
4. Il comporte 489 arrêts.
5. Chef turc. Monet en a peint plus d'un.
6. La meilleure pour observer les étoiles, c'est quand il n'y a pas de Lune. Fin du jour.
7. Comme une monture de télescope Dobson.
8. Comme un soir sans lampadaire ni Lune.
9. Guide. Problème.
10. Penses. Le Clea en produit. Source de pollution.
11. Il peut gêner l'observation nocturne, surtout s'il est accompagné de centaines des siens.

Verticalement

1. Sources de pollution.
2. Ses 7 principales étoiles sont bien connues. Pour éclairer les villes, bien avant les leds. Elle surveille aussi la Terre.
3. Elle peut être gênée par les éclairages urbains.
4. De feu. Ce que fait la pollution lumineuse aux astronomes.
5. Comme une nuit sans lampadaire ni Lune. Habitudes. Mauvaise période pour observer.
6. Le côté le plus sombre au coucher du Soleil. stib 8.
7. On y trouve l'International Dark Sky Association. Autant.
8. Direction privilégiée d'observation pour les astronomes. On peut l'indiquer par une étoile. Note.
9. S'économise en éteignant les lampadaires. Salut.

Solution p. 47



Visibilité des planètes

Mercure n'est pas observable correctement cet été.

Vénus est toujours visible le matin un peu avant le lever du Soleil mais elle disparaît petit à petit dans les lueurs de l'aube.

On trouve **Mars** dans le ciel du matin mais il faudra attendre son opposition de décembre pour bien l'observer.

Jupiter est également visible le matin au début de l'été, elle se lève de plus en plus tôt et pourra être observée le soir en septembre, en attendant son opposition le 26/09.

Saturne est à l'opposé du Soleil le 14 août dans le Capricorne. On pourra alors l'observer dès la tombée de la nuit. Avant cette date, il faudra attendre un peu son lever après le coucher du Soleil.

Quelques évènements (heures légales)

21/06 : solstice d'été à 11 h 14.

24/06 : on trouve alignées dans cet ordre dans le ciel du matin Mercure (peu visible), Vénus, la Lune, Mars, Jupiter et Saturne.

4/07 : la Terre au plus loin du Soleil, à 152 098 455 km.

13/07 : la Lune est pleine et au périgée, on aura donc une grosse pleine Lune, de 33,5' de diamètre apparent (voir pages suivantes).

12/08 : maximum des Perséides (étoiles filantes).

14/08 : opposition de Saturne.

14/09 (soir) : occultation d'Uranus par la Lune (voir p. 37).

Lune

Nouvelle Lune : les 29/06, 28/07, 27/08.
Pleine Lune : les 13/07, 12/08, 10/09.

Voici quelques détails sur trois évènements de cet été

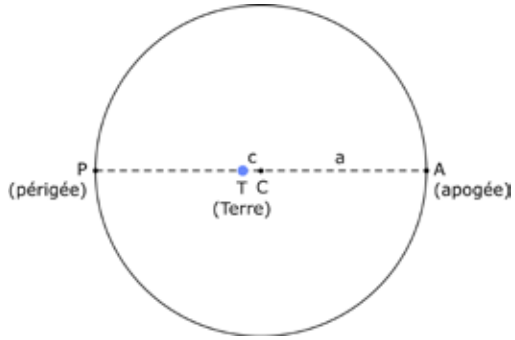
Verra-t-on une super Lune le 13 juillet ?

Régulièrement, les médias annoncent une super Lune, un évènement qualifié d'exceptionnel.
« Ne ratez pas la première «super Lune» de l'année, à observer dans la nuit de ce samedi à dimanche... Un spectacle magnifique pour les amoureux de beaux ciels nocturnes » (Midi libre).
« Ce dimanche, une «super lune» sera visible dans le ciel français durant près de cinq heures entre 17 heures et 21 h 45. L'occasion de réaliser de superbes clichés nocturnes » (le Bien public)...
Nous risquons de retrouver des annonces de ce genre pour la pleine Lune du 13 juillet 2022. Mais essayons de mieux comprendre le phénomène.

La trajectoire de la Lune

La Lune suit une orbite approximativement elliptique autour de la Terre ; elle passe régulièrement à son périgée, le point se son orbite le plus proche de notre planète et à son apogée, le point le plus éloigné.
Avec un demi grand axe de 384 400 km et une excentricité moyenne de 0,0549 pour son orbite, on peut calculer facilement les distances au périgée et à l'apogée : on obtient 363 300 km et 405 500 km (voir encadré).

Le calcul
Le point C est le centre de l'ellipse, T est la Terre.
L'excentricité est notée e, le demi grand axe CP ou CA est a et la distance CT, c.
e = c/a d'où c = a×e = 21 100 km.
TP = a – c = 363 300 km ;
TA = a + c = 405 500 km



Orbite moyenne de la Lune dessinée à l'échelle.

Mais, attirée par la Terre et le Soleil, la Lune suit une orbite complexe que l'on peut assimiler à une ellipse qui se déforme avec une excentricité variable. Celle-ci est maximale lorsque le grand axe de l'ellipse est dirigé vers le Soleil.
Ainsi, la distance au périgée varie, sa valeur peut descendre sous les 356 400 km comme ce fut le cas le 4 janvier 1912 (356 375 km). Plus récemment, le 14 novembre 2016, nous avons eu un périgée minimum à 356 510 km.
Le 13 juillet 2022, la Lune passera au périgée à 11 h 06 min TU, sa distance à la Terre sera de 357 264 km. C'est donc un périgée parmi les plus proches de la Terre. La Lune sera pleine un peu plus de 9 heures plus tard, à 20 h 38 min et sera alors située à 357 489 km. Toutes les distances sont données de centre à centre.



La pleine Lune du 16 avril dernier se levant juste après le coucher du Soleil. La distance de la Lune était alors de 370 260 km. Comme pour le Soleil se levant ou se couchant, la couleur orangée est due à la diffusion du bleu par l'atmosphère (APN compact avec zoom).

Qu'appelle-t-on super Lune ?

Lors de la pleine Lune, notre satellite apparaît plus ou moins gros suivant sa distance à la Terre. Son diamètre apparent varie de 29,4' à 33,5'. On a inventé le terme de super Lune pour une pleine Lune particulièrement grosse donc proche d'un périgée. Pour certains, il faut que la distance Terre Lune soit inférieure à 359 000 km, l'Observatoire de Paris parle de 356 600 km, il n'y a donc pas de définition bien précise. La pleine Lune du 13 juillet, à 357 489 km de nous, est déjà appelée super Lune sur certains sites bien que sa distance dépasse (de peu) la limite donnée par l'Observatoire de Paris.

Que voit-on lors d'une super Lune ?

« Notre satellite naturel semble plus grand de 14 % par rapport à sa taille habituelle et aussi 30 % plus brillant », c'est ce qu'on peut lire lors de « super Lunes » dans certains médias. Vérifions :
Supposons la Lune à 356 600 km de la Terre. C'est 93 % de la distance moyenne de 384 400 km. La Lune est donc plus proche de 7 % seulement par rapport à sa distance moyenne. On obtient quasiment le même écart pour son diamètre apparent qui sera 8 % supérieur au diamètre apparent moyen (33,5' contre 31').
Quant à l'éclat de la Lune, il est inversement proportionnel au carré de la distance :
$384\,400^2/356\,600^2 = 1{,}16$.
On trouve donc un écart de 16 % et non de 30 %.
Lors d'une super Lune, la Lune apparaît donc 8 % plus grosse (en diamètre) qu'une Lune moyenne et 16 % plus lumineuse.

Pour la pleine Lune du 13 juillet, les pourcentages sont plus précisément de 7,5 % et 15,6 %.
Les médias qui donnent 14 % et 30 % comparent en réalité les valeurs pour la Lune la plus proche à la Lune la plus lointaine (à l'apogée). On pourrait donc écrire que, lors d'une super Lune, « notre satellite naturel semble plus grand de 14 % par rapport à sa taille minimale et aussi 30 % plus brillant ».

Cette Lune si grosse est-elle spectaculaire ? La frise ci-dessous compare les différentes pleines lunes de 2022, Les différences sont visibles sur le schéma parce que les lunes sont représentées côte à côte ici, mais sans cela, seriez-vous capable à l'œil nu de reconnaître une super Lune quand il n'y en a qu'une dans le ciel ? Cela ne semble pas évident... à moins que vous n'ayez un moyen de mesure.



Les pleines lunes de 2022. Celles du 17/01 et du 13/07 sont les plus grosses de l'année (diamètre apparent de 33,4'), suivies de près par celles du 12 août et du 16 mai. Les plus petites sont celles du 8/12 (29,8') et du 16/02 (30,5').

Quelle observation faire pendant une super Lune ?

C'est « l'occasion de réaliser de superbes clichés nocturnes » disait un journal pour la super Lune du 3 décembre 2017. Mais, comment, en regardant une photo, peut-on distinguer une super Lune d'une Lune ordinaire ? Il n'y a aucun moyen... Il suffit de zoomer un peu plus pour faire apparaître la Lune plus grosse. On peut toujours faire de belles photos de pleine Lune, que ce soit une pleine Lune de périgée ou d'apogée. Ce qui peut être intéressant, c'est de photographier différentes pleines lunes, toujours avec la même focale, pour comparer ensuite les résultats et éventuellement calculer l'excentricité de l'orbite lunaire.

Super Lune ou super fausse nouvelle ?

Une super Lune n'a donc rien d'exceptionnel. Le battage médiatique qui en est fait permet de parler d'astronomie. Mais les personnes qui s'attendent à un spectacle magnifique risquent d'être déçues...
De plus, il y a souvent confusion entre le diamètre apparent de la Lune tel qu'on peut le mesurer et celui que notre cerveau imagine. Quand la Lune se lève à l'horizon, elle apparaît souvent énorme, mais ce n'est qu'une illusion (voir hors-série n° 13 p 113).
Pour terminer, voilà ce qu'on peut lire sur un site dédié au jardinage avec la Lune, à propos de la super Lune :
« Cette différence de taille est également accentuée lorsque la Lune se lève et se couche. On peut alors comparer la Lune aux éléments éloignés de l'horizon (montagnes, arbres, bâtiments…) qui par illusion d'optique la font sembler plus grosse. D'autre part, lorsque nous regardons la Lune, notre vision traverse la couche d'atmosphère. Celle-ci étant plus importante lorsque nous regardons vers l'horizon, le nombre de particules en suspension sera également plus important et accentuera l'effet de loupe. La lune apparaît donc plus spectaculaire lorsqu'elle se lève ou lorsqu'elle se couche. »
Si la première phrase est correcte, la suite n'est qu'une grossière erreur : comment des poussières pourraient faire loupe ? Elles vont rendre la Lune orange ou rouge mais jamais la grossir !
Mais que toutes ces considérations ne vous empêchent pas d'admirer la pleine Lune du 13 juillet, qui est quand même la plus grosse pleine Lune de l'année...

Les Perséides du mois d'août

2022 ne sera pas une année propice à l'observation des Perséides : la pleine Lune a lieu le 12 août, jour même du maximum de cet essaim d'étoiles filantes. Essayez quand même d'en repérer quelques-unes, plutôt les jours qui précédent, le matin avant le lever de la Lune.

L'occultation d'Uranus du 14 septembre

Dans la nuit du 14 au 15 septembre 2022, la Lune va occulter Uranus entre 23 h 10 et 0 h 20 environ (heures légales) en France métropolitaine. Ce sera l'occasion de trouver cette planète facilement. À observer avec un instrument ou même aux jumelles. Uranus sera plus facile à voir à la fin de l'occultation, on sera moins ébloui par le côté éclairé de la Lune.
Attention, l'heure précise dépend de votre lieu d'observation.
Pour le centre de la France (47° N, 2° E) :
Début de l'occultation : 23 h 19 min Fin de l'occultation : 0 h 14 min (heures légales)



TEMPS ET DISTANCES DANS L'UNIVERS

LES DIFFÉRENTS DÉCALAGES VERS LE ROUGE

Patrice Bouchet, Département d'astrophysique Cea-Saclay, Béatrice Sandré

Nous lisons souvent dans des journaux à grands tirages qui, hélas, manquent souvent de journalistes éduqués aux faits de la science, des actualités qui nous informent, par exemple, que : « *une galaxie très lointaine a été découverte. Elle est située si loin que la lumière que nous percevons aujourd'hui l'a quittée lorsque l'Univers avait moins de 10 % de son âge actuel, et elle a donc voyagé pendant 13 milliards d'années* ».

Soyons clairs, ceci n'est pas une information sérieuse, dès lors qu'elle ne nous renseigne en rien. Le lecteur attentif et curieux ne manquera pas de se questionner :

- Si la galaxie est actuellement à 13 milliards d'années, elle n'était alors lorsqu'elle a émis cette lumière qu'à 1 milliard d'années de nous. Pourquoi a-t-elle donc tant tardé ?
- Si la galaxie était à 13 milliards d'années-lumière lorsque les photons que nous recevons aujourd'hui l'ont quitté 1 milliard d'années après le Big Bang, elle aurait donc voyagé à une vitesse de plus de 13 fois celle de la lumière ?

(Pour des raisons de simplicité de calcul mental, nous supposons dans cet exemple que l'Univers est âgé de 14 milliards d'années, l'âge communément accepté de nos jours étant de 13,75 d'après les observations de WMAP et surtout de Planck).

L'étudiant, le professeur ne manqueront pas de se poser la question : la distance d'alors ? Celle d'aujourd'hui ? La distance parcourue par la lumière ? La distance déduite de la luminosité ? Celle déduite des déformations géométriques des galaxies lointaines ? Et quid de l'expansion de l'Univers qui vient tout perturber ?

Répondre à ces questions n'est pas une simple affaire. S'y essayer présuppose en premier lieu d'accepter un modèle cosmologique qui soit construit sur des bases cohérentes établies à partir d'observations.

La notion même de distance sème un flou car il y en a plusieurs et elles peuvent être toutes très différentes les unes des autres car elles représentent chacune une particularité de notre Univers. Il en est de même pour le temps. Certains philosophes se complaisent à nous enseigner que le temps, en fait, n'existe pas, mais que seule la durée aurait un sens. Solution facile dans l'absolu, mais qui ne résout rien quant à nos questions sur cette galaxie dont la lumière a voyagé durant 13 milliards d'années, dans un univers qui s'en souciait peu, et qui pour une raison ou une autre (nous n'en savons fichtre rien !) a décidé de s'accélérer il y a 7 milliards d'années. Une accélération dont, en fait, malgré l'imagination et le génie de nos théoriciens, nous n'en connaissons ni la cause, ni ce qu'elle produira *in fine* ! Nous ne savons même pas si elle continue à agir à l'heure actuelle ! Après avoir rompu la barrière de l'attraction gravitationnelle, cette expansion se heurtera-t-elle à une autre, alliance entre le temps et l'espace, dont la notion même nous échappe ?...

Nous ne savons rien, mais nous avons à notre disposition des facteurs d'analyse qui nous permettent de palpiter au rythme de nos observations. La clé de ces réflexions reste le décalage vers le rouge observé dans le spectre électromagnétique des objets étudiés.

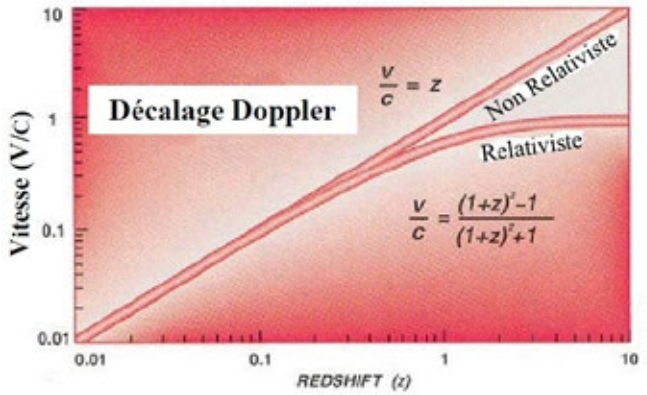
L'explication du fait que le spectre des galaxies est décalé vers le rouge, voire l'infrarouge, qui est la plus usuelle fait appel à l'effet Doppler-Fizeau. Cette explication est tout à fait correcte pour des distances proches, et le passage d'une voiture de course ou la sonnerie d'une ambulance sont là pour en témoigner :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

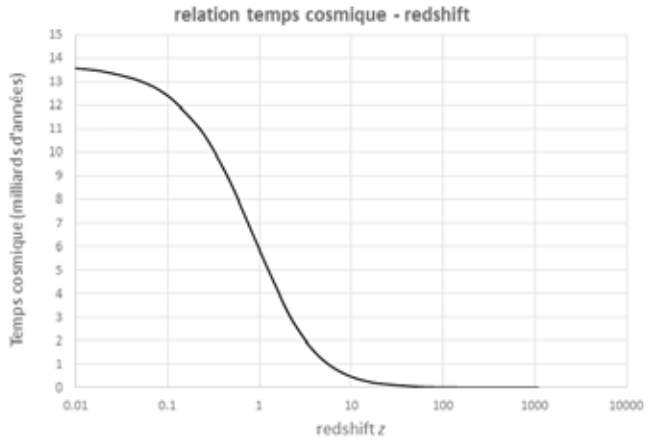
En clair, le bruit émis par un objet qui s'éloigne à grande vitesse est d'une fréquence plus grave que celui émis du même objet qui s'approche de nous, plus aigüe.

Pourtant, cette formule voudrait dire que le maximum du décalage serait de $z = 1$ si nous admettons que rien ne peut aller plus vite que la lumière. Or les astronomes depuis bien longtemps ont observé des décalages z beaucoup plus grand que cette valeur « limite ». La vitesse à considérer serait donc plus grande que celle de la lumière ? Et pour une vitesse infinie, le décalage serait infini ?
En fait, il se trouve que si l'effet Doppler peut expliquer les décalages vers le rouge pour des objets relativement

proches, ce n'est plus le cas pour des distances plus lointaines. Le diagramme ci-dessous nous indique clairement qu'à partir de la valeur z > 0,1 il faut faire appel à la relativité restreinte.



La courbe ci-dessous nous fournit l'équivalence entre l'âge de l'Univers et la valeur du décalage, (reproduite d'après Éric Simon, Webastro) :



Pour un décalage Z = 0,1 nous voyons que l'Univers était alors âgé de 12,4 milliards d'années. La lumière qui nous parviendrait aura donc voyagé pendant 1,3 milliard d'années. Que demander de plus, puisque nous pensons avoir tout compris ?

Il reste malgré tout certaines questions que nous devons nous poser : si une galaxie s'éloigne à une vitesse constante (proche de celle de la lumière, c) et que la lumière, qu'elle a émise lorsque l'Univers avait la moitié de son âge actuel, nous parvient juste maintenant, cela voudrait-il dire que nous serions incapables de regarder en arrière plus de la moitié de l'Univers ? Mais alors, quid du fond diffus cosmologique, des galaxies lointaines, des quasars ?

D'un autre côté, si un paquet de photons qui serait parti à la naissance de l'Univers nous parvenait maintenant, il devait donc être à 13,7 milliards d'années de nous. Mais la théorie du Big Bang nous dit que la partie de l'Univers observable maintenant était alors extrêmement petite alors… Alors ?

Quelque chose « cloche » ! Ce quelque chose c'est la théorie de la relativité générale qui nous aide à le comprendre. L'espace est devenu une pâte à modeler, les effets gravitationnels fabriquent l'espace-temps. L'Univers est un espace continu à 4 dimensions, rempli de matière et d'énergie. C'est surtout une substance qui peut être déformée, triturée, étirée, ou simplement coupée en deux. C'est la matière désormais qui définit sa courbure. L'espace dit à la matière comment se déplacer, et la matière dit à l'espace comment se courber. La lumière sera aussi étirée. En s'appuyant sur le principe cosmologique (un univers homogène et isotrope) la théorie de la relativité générale nous dit que les décalages vers le rouge résultent de la dilatation de l'espace-temps, et non pas de mouvements radiaux. (Encadré 1).

Encadré 1

L'Univers (à une dimension) est représenté à la date T_a par des boutons orange (les galaxies), cousus à intervalles réguliers (Univers homogène) sur un élastique (figure 1).
À une date T_m postérieure à T_a, la distance moyenne entre deux galaxies a augmenté ; l'élastique s'est allongé (figure 2).

Figure 1 : l'Univers à la date T_a



Figure 2 : l'Univers à la date T_m



Il existe donc à grande échelle, un décalage des longueurs d'onde que l'on appelle le redshift cosmologique (R(t) étant le facteur d'échelle). (Encadré 2).

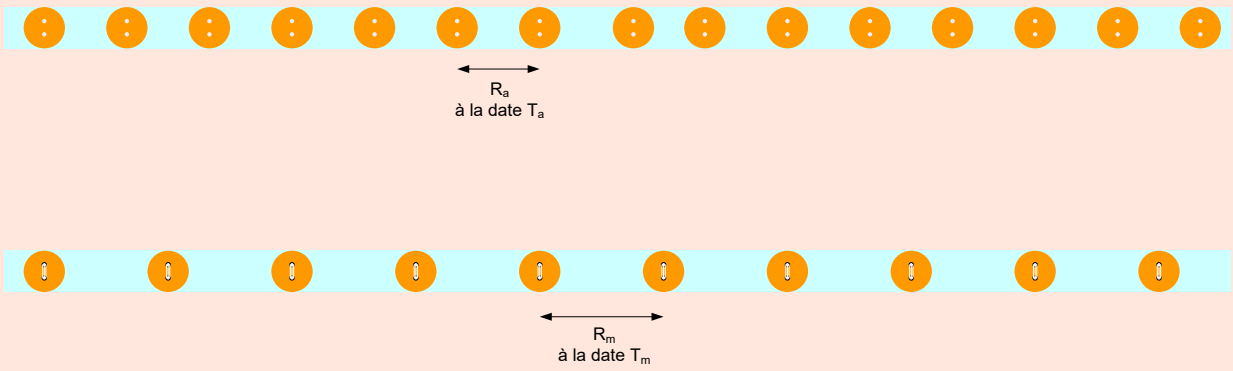
Encadré 2

On peut se représenter le facteur d'échelle de l'Univers R comme la distance moyenne entre 2 galaxies (ou 2 boutons) comme sur la figure 3.

Entre les dates T_a et T_m , toutes les longueurs de l'Univers ont été multipliées par le même facteur $\frac{R_m}{R_a}$, y compris les longueurs d'onde de la lumière émise à la date T_a (λ_a) et reçue à la date T_m (λ_m) : $\frac{\lambda_m}{\lambda_a} = \frac{R_m}{R_a}$

Or, par définition du décalage spectral, $z = \frac{\lambda_m - \lambda_a}{\lambda_a}$ d'où $\frac{R_m}{R_a} = z + 1$

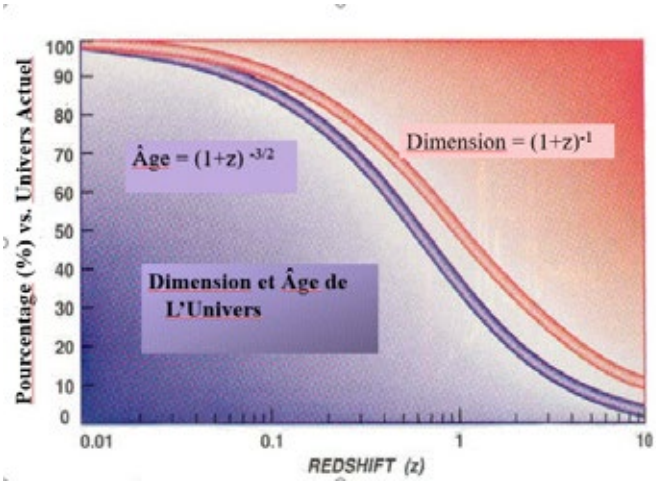
Figure 3 : le facteur d'échelle



$$z = \frac{R_0}{R} - 1$$

C'est bien ce z que nous mesurons en dehors du groupe local, puisque la géométrie à de grandes distances invalide l'utilisation de la relativité restreinte. L'utiliser serait équivalent à dessiner la carte des pôles sans prendre en compte la courbure de la Terre !

Les modèles théoriques actuels nous fournissent une relation entre z et la dimension et l'âge de l'Univers.



Ils sont robustes, dans le sens où ils rendent compte des observations.

Il y a aussi un autre mécanisme physique qui produit un décalage des longueurs d'onde vers le rouge, que l'on appelle le redshift gravitationnel : lorsqu'ils passent à travers un champ gravitationnel les photons perdent de leur énergie, ce qui réduit donc leurs fréquences. C'est l'expérience qui a montré que la lumière était déviée de 1,75 seconde d'arc au bord du disque solaire, qui corroborait la théorie de la relativité générale d'Einstein. Selon cette théorie, le décalage vers le rouge peut s'exprimer par :

$$z = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1$$

(M étant la masse du corps déviant, r son rayon, G la constante gravitationnelle)

Dans le cas du Soleil, ce décalage est très faible :

$$z = \left(1 - \frac{2(6.67 \times 10^{-14})(1.99 \times 10^{30})}{(7 \times 10^{5})(3 \times 10^{8})^2}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1$$

$$z = 2 \times 10^{-6}$$

Ce décalage n'est en effet significatif qu'aux environs de corps super massifs, étoiles à neutrons et trous noirs. Ainsi, en 2018, la collaboration *Gravity* (Instituts Max Planck de Munich –MPIE– et de Cologne –MPIA), le LESIA de l'Observatoire de Paris, et l'IPAG de l'Université Grenoble Alpes a réussi à mesurer un décalage vers le rouge $z = 7.10^{-4}$ pour l'étoile S2 qui gravite autour du trou noir super massif Sgr A*, à partir d'observations réalisées avec le VLT de l'ESO et les instruments SINFONI et NACO.

Comme nous le voyons, selon les distances considérées et les masses en jeu, le décalage vers le rouge peut s'expliquer de différentes manières, quand bien même l'effet Doppler est le plus souvent mentionné, à juste titre puisque c'est celui qui gouverne notre espace proche. Pourtant, celui qui nous concerne directement lorsque nous prétendons remonter aux origines, c'est le décalage cosmologique. Mais si nous voulons regarder loin, étudier le rôle des corps massifs dans un espace malléable, il nous faut aussi prendre en compte le décalage gravitationnel à une époque où il pouvait être de première importance en fonction des masses en jeu.

Il reste que le redshift z cosmologique est la seule quantité observable pour des objets à grande distance, à partir duquel seront déduits distances variées, temps et durée trop souvent confondus, et c'est bien la valeur de ce paramètre que va aller chercher au plus lointain de l'Univers le *James Webb Space Telescope* (JWST).

Alors qu'en est-il des distances ? Soulignons tout d'abord que la théorie de la relativité générale est une théorie qui fonctionne, en ce sens qu'elle rend compte des observations : (i) avance du périhélie de Mercure ; (ii) inflexion de la lumière au bord du disque solaire durant une éclipse ; (iii) observations de décalages gravitationnels aux abords d'objets massifs ; (iv) télémétrie laser-Lune pour tester l'invariance de Lorentz, c'est-à-dire la recherche de transgressions des principes de la relativité restreinte, testée avec la mission franco-française *Microscope* (« *Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence* »), mission financée et pilotée par le Centre national d'études spatiales, CNES, conçue et réalisée par l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), qui a pris fin en 2018 et dont l'analyse des résultats est toujours en cours, (v) *Gravity Probe B* (2004 – 2010) qui a mesuré la décroissance prévue de 2,8 centimètres dans son orbite de 40 000 kilomètres avec une précision de 0,25 %, tout en confirmant l'effet Lense-Thirring selon lequel la rotation de la Terre « tourne » l'espace-temps environnant (comme si la Terre en rotation était immergée dans du miel), et bien d'autres observations encore que la théorie newtonienne ne pouvait expliquer.

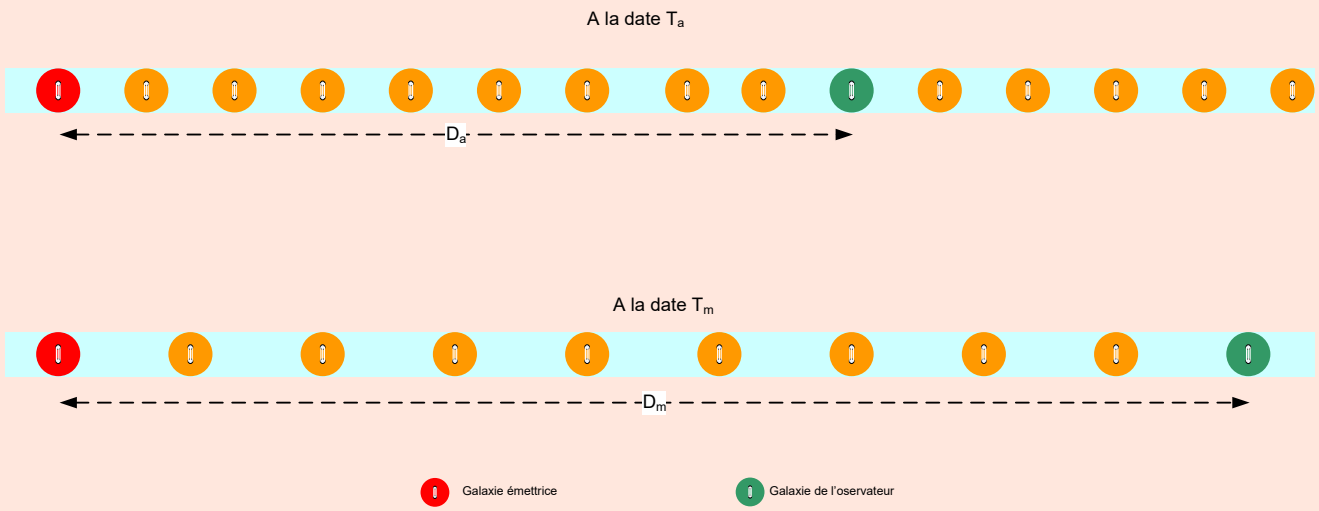
Bien que cela puisse paraître intuitif, il est trop souvent omis de préciser de quelle distance nous parlons : la distance « d'avant », celle à laquelle était l'objet lorsque la lumière fut émise (D_a) ; la distance à laquelle est cet objet maintenant (D_m) ; la distance qu'a parcourue la lumière avant de nous arriver (D_{vdl}, pour « voyage de la lumière ») [Encadré 3] ; mais aussi la distance déduite de la luminosité de l'objet (puisque nous savons que cette luminosité décroit selon l'inverse du carré de la distance (D_l). C'est sans doute la distance dont la notion est la moins comprise lorsqu'il s'agit de cosmologie : si pour les objets relativement « proches », elle fournit une information relativement fiable quant à leur distance, dans le cadre de la cosmologie on ne peut plus faire une telle approximation.

En effet, si on raisonne dans un univers en expansion, la luminosité reçue par un observateur dépend de cette expansion, le photon émis par la source lumineuse parcourant une distance supplémentaire durant son trajet dû à l'« étirement » des distances. L'atténuation observée est alors plus importante que celle correspondant à la distance de l'objet à l'observateur au moment de l'émission du photon. En d'autres termes, l'expansion de l'Univers fait que les galaxies paraissent beaucoup plus lointaines qu'elles ne le sont en réalité. Ce qui explique que cette distance pour des objets extrêmement lointains atteint des valeurs extrêmes qui ne reflètent en rien la réalité géométrique d'un œil « euclidien ». Notons cependant que c'est à partir de la relation distance de luminosité – redshift qu'a pu être découverte l'accélération de l'expansion de l'Univers. (Encadré 4).

Encadré 3

D_a est la distance entre la galaxie émettrice et l'observateur à la date T_a.
D_m est la distance entre la galaxie émettrice et l'observateur à la date T_m.

Figure 4 : les distances

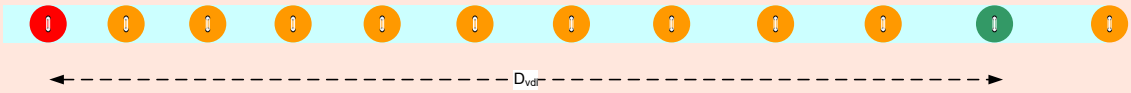


$$\frac{D_m}{D_a} = \frac{R_m}{R_a} = z + 1$$

Si on appelle D(t) la distance entre la galaxie émettrice et l'observateur à la date t et R(t) le facteur d'échelle de l'Univers à cette même date,

$$\frac{D(t)}{R(t)} = \frac{D_a}{R_a} = \frac{D_m}{R_m} = r$$

r est appelée **coordonnée comobile** de la galaxie émettrice.



$$D_{vdl} = c\left(T_m - T_a\right)$$

Au cours du voyage de la lumière depuis la galaxie émettrice, jusqu'à l'observateur, « l'élastique » s'allonge de plus en plus et les chemins à parcourir d'un bouton au suivant sont de plus en plus long. Ils mesuraient R_a au début du voyage et R_m à la fin. La distance D_{vdl} est donc comprise entre D_a et D_m.

Le lecteur trouvera aussi au cours de ses recherches d'autres distances, que l'on ne fera qu'évoquer ici. En premier lieu, la distance angulaire, qui découle du rapport entre la taille réelle et la taille observée. Il est bien connu que plus un objet est lointain, et plus sa taille diminue.
Mais la relation entre les deux, qui reflète les observations réalisées dans un univers proche, n'est plus la même dans un univers relativiste : un univers plat en expansion tend à faire voir un objet plus grand qu'il ne l'est, comme par un effet de loupe.
De plus, aussi bien la distance de luminosité que la distance angulaire influent sur la brillance de surface des galaxies, qui n'est que le rapport entre sa luminosité divisée par sa surface.

Celle-ci était constante dans un univers newtonien, alors qu'elle décroît inversement proportionnellement avec le redshift z dans un univers relativiste.
Il n'est pas question ici de reprendre tous les calculs. Il suffit au lecteur de comprendre que :

$$\left.\begin{array}{l} D_a < D_{vdl} < D_m < D_l \\ D_l = D_m(1+z) \\ D_m = D_a(1+z) \end{array}\right] D_l = D_a(1+z)^2$$

Encadré 4 : distance luminosité

Soit Dn le nombre de photons de fréquence n_e quittant la galaxie émettrice entre les dates T_a et $T_a + DT_e$.
Les premiers qui partent à T_a auront une longueur d'avance sur les derniers de $d_e = c\Delta T_e$.
À la date T_m d'arrivée à l'observateur, les premiers seront distants des derniers de :

$d_r = d_e(1+z) = c\Delta T_e(1+z) = c\Delta T_r$ car l'expansion de l'Univers entre T_a et T_m a multiplié toutes les distances

par $\frac{R(T_m)}{R(T_a)} = 1+z$

De plus, les longueurs d'onde ont elles aussi été multipliées par $1+z$; les fréquences et donc les énergies des photons ont été divisées par $1+z$.

La puissance d'émission de cette galaxie était $L_e = \frac{\Delta n \times h\nu_e}{\Delta T_e}$.

La puissance à la réception est $L_r = \frac{\Delta n \times h\nu_r}{\Delta T_r} = \frac{\Delta n \times h\nu_e}{\Delta T_e \times (1+z)^2} = \frac{L_e}{(1+z)^2}$

L'Univers étant supposé homogène et isotrope, cette puissance à la date T_m est uniformément répartie sur une sphère de rayon D_m. D_m est la distance entre la galaxie émettrice et l'observateur à la date T_m de réception.

L'éclat reçu par l'observateur est donc $E = \frac{L_r}{4\pi D_m^2} = \frac{L_e}{4\pi\left[D_m(1+z)\right]^2}$

Or, la distance luminosité D_l est définie par $E = \frac{L_e}{4\pi D_l^2}$ d'où : $D_l = D_m(1+z) = D_a(1+z)^2$

Il en est de même pour l'âge de l'Univers : il nous faut différencier le temps actuel lorsque nous recevons la lumière (Tm, pour Temps maintenant) et le temps où la lumière a été émise (Ta, pour Temps avant)) ; de la même façon, le rayon de l'Univers, maintenant Rm, et avant Ra.

Nous pouvons expliciter chacun des termes (les équations sont relativement simples) : pour cela, la première chose à faire, c'est de choisir un modèle de l'Univers. Il est en dehors du cadre de cet article d'expliquer les tenants et aboutissants dans lesquels se perdent parfois les cosmologistes. Les deux paramètres à considérer sont (1) la valeur de la constante de Hubble H_0 qui relie (entre autres) distance et vitesse de la récession apparente des galaxies dans l'univers observable (la fameuse loi de Hubble), et (2) la densité de matière Ω dans cet univers qui définit sa géométrie, et qui est la somme de ce que ne voyons pas Ω_Λ (l'énergie noire), et Ω_M (la matière baryonique, que nous voyons peu ou pas). Nous resterons très conventionnels et choisirons H_0 = 72 km/s/Mpc, et Ω_0 = 1 , c'est-à-dire la valeur actuelle équivalente à la densité critique, qui fait que l'Univers est « plat » (c'est ce qu'on appelle un univers Einstein – de Sitter). (Encadré 5).

Dans ce cadre théorique accepté par la grande majorité des astronomes, la formule fondamentale qu'il nous faut utiliser pour toutes ces considérations est :

$$\frac{R_m}{R_a} = (z+1) = \left(\frac{T_m}{T_a}\right)^{\frac{2}{3}}$$

(T en milliard d'années)

Soit :

$$T_a = T_m \times (z+1)^{-1.5}$$

Une fois Ta connu, les distances se calculent avec les formules suivantes (encadré 6) :

$$D_a = 3 \times T_a \times \left[(z+1)^{\frac{1}{2}} - 1\right]$$
$$D_m = D_a(1+z)$$
$$D_l = D_m(1+z)$$
$$T_{vdl} = T_m - T_a$$

Prenons un exemple concret : un décalage vers le rouge dans le spectre d'une galaxie mesuré à z = 1 (nous considérerons dorénavant l'âge de l'Univers actuel Tm = 13,75 milliards d'années).

Par définition du redshift cosmologique :

$$\frac{R_m}{R_a} = 2 \rightarrow \text{Ta} = 4{,}9 \text{ milliards d'années,}$$

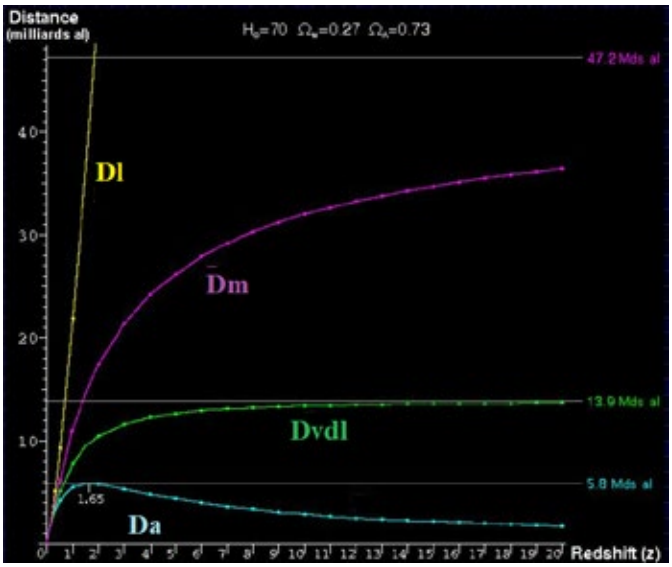
et lorsque la lumière a été émise, la distance de la galaxie à la nôtre était alors Da = 6 milliards d'années-lumière ; elle est maintenant à la distance Dm = 12 milliards d'années-lumière, et sa distance de luminosité est de 24 années-lumière. Depuis qu'elle a été émise, la lumière que nous recevons maintenant a voyagé durant (Tm - Ta) = 8,85 milliards d'années, et a donc parcouru une distance de 8,85 milliards d'années-lumière.

Le lecteur pourra s'amuser à faire les mêmes calculs pour la galaxie la plus lointaine observée à ce jour : la petite galaxie GN-z11 observée dans le champ de la Grande Ourse, dont le spectre présente un décalage vers le rouge z =11,09. Il pourra constater que si la plupart des informations disponibles dans la presse et sur la toile s'accordent généralement sur le fait que la lumière reçue a été émise lorsque l'Univers n'avait que 327 millions d'années, les valeurs de distance peuvent différer selon le modèle cosmologique tenu pour « bon » (H, Ω, âge de l'Univers), et le manque de claire définition de ce dont il est fait état ! Compte tenu des incertitudes sur la valeur de tel ou tel paramètre, nous pouvons affirmer que la galaxie GN-z11 était alors à 2,4 milliards d'années-lumière de la nôtre (Da), et qu'elle elle est actuellement à 29,4 milliards d'années-lumière (Dm). Elle a voyagé pendant 13,4 milliards d'années et sa distance de luminosité est de 356 milliards d'années-lumière.

Qui ne serait guère intéressé à refaire ces calculs peut utiliser le diagramme ci-dessous (en partie reproduit du site https://www.astronomie-ca.com). Mais attention ! la valeur H_0 est légèrement différente de celle considérée dans cet article (70 au lieu de 73), et l'Univers est plus âgé dans ce modèle que ne le montrent les dernières observations (13,9 milliards d'années au lieu de 13,75).

Il reste que, compte tenu des incertitudes, ce diagramme fournit les informations nécessaires à tout lecteur avisé qui voudrait comprendre ce que nous disent certains journalistes qui veulent de bonne foi nous informer, mais qui n'ont rien compris à la merveilleuse aventure qu'est l'expansion de l'Univers

L'objectif de cet article est de fournir des outils pour que les professeurs aident leurs étudiants à décrypter les informations fournies dans la presse. Les premières questions qu'ils doivent se poser sont :



- Quel modèle cosmologique ? (L'espace est-il considéré comme plat, ou doté d'une courbure soit positive, soit négative ?)
- Quelle valeur de la constante de Hubble a été considérée ?
- De quel redshift s'agit-il ? (Cosmologique ou Doppler-Fizeau ?)
- Et surtout, de quelle distance s'agit-il ?

L'étudiant pourra alors interpréter, par exemple, une note parue dans Science News, le 17 avril 1999 :

« Une galaxie a été découverte à 14,25 milliards d'années-lumière de la Terre. La lumière a quitté la galaxie quand l'univers avait seulement 5% de son âge actuel. Son spectre présente un décalage vers le rouge de 6,68 »

Il comprendra alors que les informations essentielles manquent et que la distance indiquée n'est que la distance parcourue par la lumière, sans rapport avec la distance réelle par rapport à nous, ni au moment de son émission, ni au moment de l'observation. Je le laisse faire les calculs….

■

Encadré 5

Dans le cas d'un univers rempli d'un fluide (gaz dont les particules sont des galaxies) parfait, homogène, isotrope et de pression nulle, les équations d'Einstein régissant l'évolution de l'Univers s'écrivent :

$$\chi\rho c^2 = \frac{3}{c^2R^2}\left(kc^2 + \dot{R}^2\right) - \Lambda \qquad (1)$$

$$\chi P = 0 = -\frac{1}{c^2}\left(2\frac{\ddot{R}}{R} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{kc^2}{R^2}\right) + \Lambda \qquad (2)$$

R est le facteur d'échelle de l'Univers, $\dot{R}$ et $\ddot{R}$ ses dérivées première et seconde par rapport au temps.

ρ est la masse volumique du fluide ; elle varie au cours du temps mais la conservation de la masse impose que ρR^3 soit une constante.

k = 0, -1 ou +1 selon la géométrie de l'Univers (euclidienne, hyperbolique ou sphérique).

c est la vitesse de la lumière dans le vide.

La pression *P* du gaz de galaxies est considérée comme nulle.

$\chi = \frac{8\pi G}{c^4}$ est une constante où G est la constante de gravitation universelle.

Λ est une constante d'intégration appelée constante cosmologique.

Dans le cas particulier d'un univers euclidien, k = 0, et **dans ce cas là seulement**, l'équation (1) s'écrit :

$$\frac{8\pi G}{3}\rho = \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$\frac{\dot{R}}{R} = H$ étant la constante de Hubble, cette équation peut aussi s'écrire :

$$\frac{8\pi G}{3}\rho = H^2 - \frac{\Lambda c^2}{3} \text{ soit}$$

$$\frac{8\pi G}{3H^2}\rho + \frac{\Lambda c^2}{3H^2} = 1$$

$\frac{3H^2}{8\pi G} = \rho_c$ est homogène à une masse volumique et appelée masse volumique critique.

L'équation (1) peut alors s'écrire : $\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{\Lambda c^2}{3H^2} = 1$

$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_c}$ est appelé densité de matière de l'Univers $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$ est appelée densité d'énergie du vide.

Si l'Univers est euclidien, la première équation des cosmologies peut alors s'écrire :

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Pour déterminer le modèle de notre Univers (facteur d'échelle en fonction du temps) et son point d'évolution, il est nécessaire de connaître 3 paramètres de notre Univers actuel, son âge t_0, sa densité ρ_0 à cette date et la constante de Hubble $H_o = \frac{\dot{R}}{R}$ actuelle .

Encadré 5 (suite)

Le modèle d'univers ainsi déterminé fixe sa géométrie (valeur de k) et la valeur de la constante cosmologique.
Mais si on suppose la constante cosmologique nulle, 2 paramètres suffisent, ρ_0 et H_0.

Et dans le cas particulier où ρ_0 serait juste égal à $\frac{3H_o^2}{8\pi G} = \rho_{c_o}$ l'Univers serait euclidien.

Ce modèle d'Univers euclidien à constante cosmologique nulle est appelé modèle d'Einstein-de Sitter.

Dans le cas général, (k et Λ non nuls), on peut toujours noter Ω la somme $\Omega_m + \Omega_\Lambda$ mais Ω n'est en aucun cas une densité de matière.

Seule Ω_m est une densité de matière, sensible à la gravitation. La masse volumique ρ diminue au cours de l'expansion de l'Univers de telle sorte que la masse gravitationnelle soit conservée : ρR^3 est une constante. Cette matière est composée de la matière que nous connaissons (protons, neutrons, électrons …) et de matière que nous ne connaissons pas (mais qui se manifeste dans les courbes de rotation des galaxies, dans le spectre des fluctuations du rayonnement cosmologique…), qu'on appelle la matière noire et dont on ne sait pas grand-chose.

$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$ n'est pas une densité de matière. La densité d'énergie correspondante ne se dilue pas au cours de l'expansion.
Elle est créée en même temps que l'espace et pour cela est appelée énergie du vide. C'est elle qui permet de construire des modèles avec accélération de l'expansion. On ne sait rien de l'énergie du vide et on l'appelle énergie sombre.

Encadré 6

Le modèle le plus simple des univers relativistes non statiques est celui d'un univers euclidien et sans constante cosmologique, appelé Univers d'Einstein-de Sitter. Dans ce cas particulier la loi de variation du facteur d'échelle en fonction du temps déduite des équations d'Einstein est :

$$R(t) = R_o\left(\frac{t}{t_o}\right)^{\frac{2}{3}}$$

R_0 est le facteur d'échelle à la date t_0.
Pendant l'intervalle de temps élémentaire $t \rightarrow t + dt$, alors que le facteur d'échelle est R(t) la distance parcourue par la lumière peut s'exprimer en fonction du temps mais aussi de la coordonnée comobile soit $R(t)dr = c\,dt$.
De la date d'émission Ta de la lumière à la date de réception par l'observateur Tm, la lumière se déplace de la coordonnée comobile r = 0 à la coordonnée $r = r_c$.

$$\int_0^{r_G} dr = \int_{T_a}^{T_m} \frac{c\,dt}{R(t)}$$

$$\int_0^{r_G} dr = \frac{D_a}{R_a} = \frac{D_m}{R_m} = \int_{T_a}^{T_m} \frac{c}{R(a)}\left(\frac{T_a}{t}\right)^{\frac{2}{3}} dt$$

$$r_G = \frac{D_a}{R_a} = \frac{c}{R_a} T_a^{\frac{2}{3}} \int_{T_a}^{T_m} t^{\frac{-2}{3}} dt = \frac{c}{R_a} T_a^{\frac{2}{3}} [3t]_{T_a}^{T_m}$$

$$D_a = 3cT_a^{\frac{2}{3}}\left[T_m^{\frac{1}{3}} - T_a^{\frac{1}{3}}\right] = 3cT_a\left[\left(\frac{T_m}{T_a}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right]$$

Or, dans le modèle d'Einstein-de Sitter,

$$\left(\frac{T_m}{T_a}\right)^{\frac{2}{3}} = \frac{R_m}{R_a} = 1 + z$$

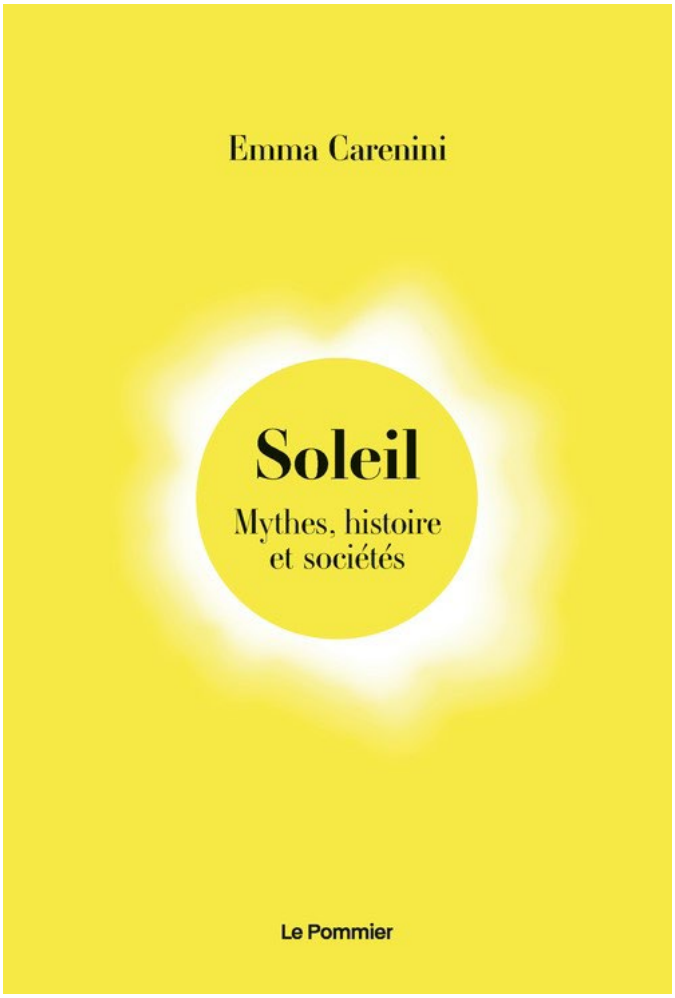
D'où

$$D_a = 3cT_a\left(\sqrt{1+z} - 1\right)$$

Cette expression n'est valide que pour le modèle euclidien à constante cosmologique nulle, dit modèle d'Einstein-de Sitter.

L'observation des supernovæ des galaxies lointaines permet de mesurer leur décalage spectral et leur distance-luminosité. On en déduit leur distance Da (encadré 4) en fonction du décalage spectral. Ces mesures ne vérifient pas la loi $D_a = 3cT_a\left(\sqrt{1+z} - 1\right)$. Le modèle d'Einstein de-Sitter n'est pas le bon.

Auteur : Emma Carenini
Date de publication : mars 2022
Éditeur : Le Pommier



Ce n'est pas un ouvrage sur le Soleil uniquement en tant qu'objet astrophysique que nous propose Emma Carenini, professeur de philosophie de son état. Ici, le Soleil est un objet mythologique, un sujet de questionnement philosophique, un « bien commun » selon ses dires.
Elle nous explique avec clarté comment très tôt dans l'histoire, même sans en comprendre le mouvement et le fonctionnement, l'humanité s'est approprié le Soleil et sa lumière. Tous les jours, le Soleil se lève et éclaire nos journées, c'est pour nous une évidence ; l'autrice nous explique que pour certains peuples, ce n'était pas aussi prévisible que cela et que le retour quotidien du Soleil relevait même du miracle. De fait, notre astre a été un peu partout associé au divin. Puis, le Soleil est devenu un objet de questionnement scientifique, permettant la mesure du temps, la planification des récoltes et la navigation. Et contribuant à remettre en cause dogmes et croyances sur la place centrale de la Terre dans l'Univers.

Il est aussi question du Soleil comme « objet de luxe » pour des vacances au soleil réussies ou une maison bien exposée ; comme élément à prendre en compte en architecture et en urbanisme justement, pour éclairer et chauffer les logements à moindre frais ; comme remède miracle à tous les maux. Enfin, la lumière de notre étoile fait l'objet de bien des convoitises pour les défis énergétiques qui se présentent à nous actuellement.

Au travers des rappels historiques et des implications philosophiques tout à fait captivants, l'autrice défend une thèse audacieuse : la philosophie et la pensée modernes ne se sont pas développées dans le bassin méditerranéen par hasard : c'est parce que le Soleil éclaire la région de la meilleure des façons, ni trop ni trop peu, et qu'il nourrit le questionnement.

On pourra faire un parallèle intéressant avec l'ouvrage *Et si nous n'avions jamais vu le ciel ?* de Laurent Polidori (Éditions Publi-Topex, 2019) qui se demande quel serait l'état de nos connaissances si le ciel était en permanence bouché par les nuages et qu'aucune observation astronomique, solaire incluse, n'avait jamais été possible. On pourra aussi continuer la réflexion historico-sociologique avec *L'invention du bronzage* de Pascal Ory (éditions Complexe, 2008).

Frédéric Pitout
■

Solutions des mots croisés page 34

Horizontalement
1. Lumineuse. **2.** Amigos. Un. **3.** Magnitude. **4.** RER. **5.** Aga. Étang. **6.** Date. Di. **7.** Azimutale. **8.** Obscur. **9.** Rêne. Os. **10.** Es. TP. SUV. **11.** Satellite.

Verticalement
1. Lampadaires. **2.** UMa (Ursa Major, la Grande Ourse). Gaz. ESA (Agence spatiale européenne). **3.** Migration. **4.** Igné. Embête. **5.** Noire. Us. PL (pleine Lune). **6.** Est. tetco (octet à l'envers, comme 8 bits). 7. USA. Aussi. **8.** Sud. NDLR (Note de la rédaction, indiqué parfois par un astérisque). Ut. **9.** Énergie. Ave.



L'éclipse totale de Lune du 16 mai au matin

Une partie de la France était sous les nuages mais certains de nos lecteurs ont pu admirer et photographier cette éclipse. Voici quelques images prises depuis la région de Draguignan avec le Collège Rostand et le lycée Jean Moulin qui se sont retrouvés au sommet du Malmont pour observer l'éclipse. Toutes les photos au télescope sont faites par une élève de TSTL avec un instrument de 730 mm de focale (images transmises par Ghislain Bernard). L'image en haut à droite est de Michel Delmas club d'astronomie de Gigouzac, Lot (APN EOS 500 D, lunette de 80 focale de 600 mm).