



Sherbrooke, Québec, Canada

---

# TEL800 - Séminaire de mémoire

---

*Présenté à*

**Martin Aubé, Ph.D.**

Directeur de maîtrise

**Norman T. O'Neill, Ph.D.**

Co-Directeur de maîtrise

*Présenté par*

**Charles Marseille, B.Sc.**

Le 22 juin 2020

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Problématique</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Questions de recherche</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Objectifs</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Théorie, hypothèses, postulats</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>État des connaissances</b>	<b>6</b>
5.1	Méthodes de mesures . . . . .	6
5.1.1	AOD . . . . .	6
5.1.2	NSB . . . . .	9
5.1.3	Méthode numérique: Modèle radiatif ILLUMINA . . . . .	10
5.2	Relation AOD-ZNSB . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Cadre expérimental</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Approche méthodologique</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Résultats escomptés</b>	<b>17</b>
<b>9</b>	<b>Retombées de la recherche</b>	<b>18</b>
<b>10</b>	<b>Organigramme, échéancier</b>	<b>19</b>
<b>11</b>	<b>Annexe</b>	<b>21</b>
11.1	Théorie de base . . . . .	21
11.2	Méthodes de mesure AOD supplémentaires . . . . .	22
11.3	Méthodes de mesures de ZNSB supplémentaires . . . . .	23
11.4	Note sur les unités . . . . .	25

# 1 Problématique

La météo et le climat sont la combinaison d'un nombre vaste de phénomènes et de leurs interactions. Les aérosols, ces particules et petites gouttelettes liquides en suspension dans l'atmosphère, sont la cause de plusieurs de ces phénomènes: ils modifient le bilan énergétique terrestre par transfert radiatif, c'est-à-dire l'absorption, la transmission et la diffusion des ondes électromagnétiques produites par le Soleil. Les causes et effets de ces aérosols, par exemple le smog et par conséquence les changements climatiques (Chin et al. 2007; Kahn et al. 2009), sont de plus en plus étudiés et leurs impacts dans une situation donnée dépend de leur propriétés, dont la plus étudiée est l'épaisseur optique des aérosols (*Aerosol Optical Depth*, AOD)(Aubé 2003). Afin de la mesurer, les méthodes actuelles utilisent des sources lumineuses externes à la Terre afin de déterminer l'atténuation de leur brillance par l'atmosphère, ce qui permet de déterminer la concentration des différentes composantes de cette dernière. Toutefois, l'utilisation de ces méthodes n'est pas possible en tout temps dû, entre autres, aux conditions météorologiques, aux mouvements des astres ou à leur présence dans le ciel en fonction de la position géographique d'un appareil de mesure sur Terre. Par exemple, la mesure n'est possible que le jour si la source choisie est le Soleil ou alors la nuit s'il y a présence de lune ou d'étoiles. Toutefois, ces trois cas impliquent une absence quasi-totale de nuages sans quoi ce ne sont plus les aérosols qui sont mesurés, mais bien la combinaison des effets de ces deux types de composantes atmosphériques et leurs interactions, d'autant plus que ce sont principalement les molécules qui déterminent la transmission atmosphérique par temps clair. De plus, les mesures de photométrie lunaire ne sont possibles que 6 mois par année et, encore moins courantes, celles de photométrie stellaire sont beaucoup plus complexes dû à l'instrumentation nécessaire.

La première facette du problème se dessine aussitôt: l'AOD ne peut être mesuré la nuit s'il n'y a présence de lune ou si les étoiles les plus brillantes ne sont invisibles au moment de la mesure. De plus, comme ces deux méthodes mesurent une intensité lumineuse à partir du sol en visant le zénith, toute source de lumière additionnelle faussera les résultats, telle la pollution lumineuse causée par les luminaires de rues, des bâtiments industriels, commerci-

aux ou résidentiels et les phares de voitures en proximité, sans parler des causes naturelles supplémentaires de brillance du ciel (Noll et al. 2012). Ces sources additionnelles, naturelles et anthropogéniques, sont la source de bruit pour les mesures et forment ensemble la brillance du ciel nocturne (*Night Sky Brightness*, NSB) et spécifiquement au zénith, la ZNSB (*Zenithal NSB*).

Ainsi, la seconde facette du problème est évidente: la pollution lumineuse modifie les résultats des mesures par photométrie lunaire ou stellaire, d'autant plus que l'éclairage anthropique peut contenir des composantes spectrales difficilement distinguables de celles obtenues dans le cadre des instruments de mesures d'AOD. En effet, la majorité de l'éclairage anthropique a des composantes sur tout le spectre du visible et les conversions aux LEDs enduites de phosphore empirent cette situation. D'autant plus, la pollution lumineuse engendre plusieurs effets néfastes sur la santé humaine (Aube et al. 2013; Lyytimaki et al 2012), celle des animaux (Gil et al. 2015; Hölker et al. 2010) et elle représente un réel problème pour les observatoires astronomiques (Riegel 1973). Un article (Irwin 2018) publié dans la revue *Nature* en 2018 résume les effets néfastes associés à la pollution lumineuse qui ne risquent pas de s'améliorer considérant les éventuelles conversions aux LEDs à travers le monde entier.

Si aucune technique n'est développée pour la détermination de l'AOD dans les conditions sans lune et sans vue des étoiles, il existera toujours un manque de données de mesures dans ces conditions, limitant grandement la connaissance des conditions atmosphériques à ces instants. Ceci limite les prédictions des modèles météorologiques et climatiques dû à la sensibilité aux conditions initiales de tout système chaotique. Cette situation ne sera jamais évitée, même qu'elle s'empirera avec le temps: l'homme crée de la pollution lumineuse là où il s'installe et elle augmente là où elle existe déjà (Bennie et al. 2014; Falchi et al. 2016). De plus, comme la présence anthropique entraîne principalement de plus hautes concentrations d'aérosols (Ramanathan et al. 2001) qui reflètent cette lumière vers le sol, le problème y est d'autant plus présent à proximité (à distance, les aérosols forment un écran bloquant la lumière anthropique). Il est alors évident que l'élaboration d'une technique de mesure de l'AOD qui permettrait d'utiliser un problème, la présence de pollution lumineuse, en tant que solution, une source de rayonnement en fins de mesures, réglerait les deux problèmes définis plus haut.

## 2 Questions de recherche

**ZNSB et AOD:** Existe-t-il une relation simple entre la brillance zénithale du ciel nocturne et l'épaisseur optique des aérosols?

**Pollution lumineuse:** Est-il possible de déterminer les cycles de variation de l'utilisation de l'éclairage dans le but d'améliorer la technique de détermination de l'épaisseur optique déduite de la ZNSB en fonction de l'heure et de la saison?

## 3 Objectifs

Le but général de ce travail de recherche consiste à mettre sur pied une méthodologie permettant de dériver l'épaisseur optique des aérosols et le coefficient d'Angstrom en mesurant la brillance du ciel nocturne sans lune et sans nuages dans 5 bandes spectrales du CoSQM (Color Sky Quality Meter<sup>1</sup>) (Aubé 2020), l'instrument de mesure de la brillance du ciel nocturne de ce projet (un SQM (Sky Quality Meter<sup>2</sup>) muni d'une roue à filtres du visible et d'un micro-ordinateur RPi pour serveur web accessible depuis tout réseau publique pour le contrôle à distance).

Afin d'y arriver, le premier objectif est de trouver une relation empirique entre les données de mesures de photomètres solaires et lunaires aux données de mesures de CoSQMs. Deux critères seront évalués: la corrélation entre les mesures de brillance du ciel par CoSQM et d'AOD par photomètre lunaire avec un modèle de brillance de la Lune et la continuité jour-nuit des mesures CoSQM avec les photomètres solaires présents aux différents sites. Comme ces données sont acquises à 3 sites d'étude différents sur Tenerife aux îles Canaries (urbain au niveau de la mer (30m), rural au-dessus du plateau d'inversion de température (2350m) et isolé au sommet du volcan Teide (3700m)), un second objectif est de caractériser cette relation empirique en fonction de la localisation. Ces sites étant bien différents en termes de brillance du ciel, il est attendu que les relations le soient aussi, impliquant l'obtention d'une relation par site. En effet, la ville de Santa-Cruz est dominée par la pollution lumineuse tandis que les deux autres sites sont principalement dominés par des sources naturelles. Un objectif

---

<sup>1</sup>Décrit à la section 5.1.2

<sup>2</sup>Voir note 1

complémentaire consiste alors en la caractérisation des habitudes d’éclairage des habitants de Tenerife. En effet, afin d’obtenir une relation entre l’AOD et la ZNSB, il est nécessaire de quantifier les contributions spectrales de nature anthropique ainsi que leur évolution dans le temps, ce qui permet la correction de leur influence sur les mesures. Afin d’effectuer ces corrections, il faut pouvoir retirer les contributions naturelles de brillance, soit le airglow (hautement dépendant de l’activité solaire (Stoeva et al. 2006; Walker 1988)), la lumière zodiacale, la diffusion de la lumière de la Lune et même la contribution des étoiles (Duriscoe 2013; Noll et al. 2012). Toutefois, comme ceci consiste en un modèle de brillance naturelle du ciel et qu’une telle équation reste à trouver pour les sites de Tenerife, seuls un modèle de radiance lunaire ainsi qu’un filtrage des nuages seront appliqués aux données de mesures.

En dernier lieu, une étude des épisodes de calima, des événements courts et intenses de transport de sable de tempêtes du Sahara, permettrait d’évaluer la sensibilité des CoSQMs, ce qui pourrait servir à reconnaître de futurs événements de nature semblable. Ces événements changent de façon drastique les propriétés de l’atmosphère dans le visible à faible altitude, ce qui devrait aisément être observé par un CoSQM.

## 4 Théorie, hypothèses, postulats

Les grandeurs clés utilisées dans le cadre de ce projet sont définies en annexe afin d’introduire la grandeur mesurée et celle dérivée par les photomètres solaires, lunaires et stellaires, soit l’AOD. Partant de ces concepts, il a été démontré (O’Neill, Dubovik, and Eck 2001; O’Neill, Eck, Smirnov, Holben, and Thulasiraman 2003) que la distribution de taille des particules est bimodale et, de par une analyse spectrale des mesures, les aérosols peuvent être classés selon deux modes: fin ( $r < \mu m$ ) et grossier ( $r \geq \mu m$ ). Ceci permet de simplifier l’analyse des données et les impacts des résultats de recherche du domaine, comparativement à l’autre méthode jusqu’à ce jour utilisée, soit la méthode de déconvolution spectrale de Dubovik (O. Dubovik and King 2000) qui modélise les aérosols en sphère rondes et réduit une fonction coût tirée d’un modèle de transfert radiatif qui présente des défis calculatoires plus importants. L’approche bimodale a été améliorée avec le temps, tel que fait pour la 4e version du programme (O’Neill, Eck, Smirnov, and Holben 2006) et est utilisée dans le cadre des

produits AERONET.

Quant au CoSQM, la grandeur mesurée est la brillance du ciel, soit l'intensité lumineuse intégrée sur la surface du capteur et l'angle de vision de l'ensemble lentille-capteur. Ainsi, toute contribution lumineuse comprise dans la bande passante de l'ensemble est mesurée et ces contributions, entre autres de sources différentes, sont la combinaison des phénomènes optiques de transmission, de réflexion et de diffusion tout comme dans le cas de l'AOD. La différence majeure entre les deux types de mesures est que dans les cas les plus intéressants pour cette méthode (zones urbaines), la brillance du ciel mesurée au sol à l'aide d'un CoSQM a pour principale source lumineuse la lumière anthropique émise à partir du sol, soit les sites à haute pollution lumineuse qui sont maintenant très répandus (ex.: Santa-Cruz). Ceci implique que le rayonnement mesuré est majoritairement dû à la diffusion par les particules en comparaison aux mesures des photomètres à sources extra-atmosphériques, dont le signal est principalement soumis à une atténuation à travers les couches de l'atmosphère. L'unité la plus utilisée dans le domaine traitant de l'intensité lumineuse est la magnitude par arc-seconde carré, qui peut être attentivement convertie en unités de luminance (Bará et al. 2020). Les valeurs de brillance du ciel sont typiquement de 7-8 mpsas (*magnitudes per square arc second*) au coucher du soleil, 16-17 mpsas pour des cieux à pollution lumineuse importante ou 21-23 mpsas pour les cieux les plus sombres. La présence de pleine lune augmente la brillance des cieux les plus sombres entre 12 et 17 mpsas, ce qui est une importante contribution et qui motive la modélisation de sa contribution, ce qui n'est toutefois pas mince affaire.

Le projet admet tout de même certaines hypothèses du domaine de la télédétection. Premièrement, de par l'intégrale de l'équation 3, une multitude de combinaisons possibles donnent la même valeur AOD, or la mesure d'AOD ne permet pas de connaître la distribution verticale des aérosols. Leur type et leur concentration varient assurément avec l'altitude, ce qui peut changer considérablement la relation AOD-ZNSB en fonction du site d'étude, de la période de l'année et des conditions d'observations. Par exemple, si l'on considère une situation à grande quantité d'aérosols, la couche la plus basse réfléchit la majorité du rayonnement dirigé au zénith (par simples arguments probabilistes ou tel qu'observé par l'effet des nuages), comparé à l'AOD qui est une fonction de l'épaisseur totale de l'atmosphère, tel que défini en 3. Or, il faut considérer que les situations les plus probables d'engendrer une

bonne corrélation des mesures seront des conditions où la quantité d'aérosols sera faible. De plus, si les mesures AOD sont effectuées à un angle zénithal non-nul, le trajet de photons est différent pour le CoSQM que pour les photomètres. Comme les appareils de ZNSB de ce projet visent le zénith, il faut prendre en considération cette réalité pour les mesures d'AOD près de l'horizon (qui considèrent une masse d'air uniforme avec la hauteur). Finalement, les contributions naturelles de la brillance du ciel sont généralement plus importantes à grand angle zénithal donc les relations les plus justes impliqueraient de faibles angles de visées pour les photomètres, ce qui impose un défi supplémentaire vu l'approche d'analyse de données choisie et décrite à la section 7.

## 5 État des connaissances

### 5.1 Méthodes de mesures

#### 5.1.1 AOD

##### **Photomètre solaire:**

En mesurant la brillance du Soleil et en connaissant sa brillance exoatmosphérique, l'AOD est obtenu par l'équation 2. Un exemple de photomètre solaire est le Cimel CE-318-T (Barreto et al. 2016) qui a pour capteur une photo-diode au silicium pour les mesures d'AOD et contient des filtres à plusieurs longueurs d'onde nominales (340, 380, 440, 500, 675, 870, 937 (vapeur d'eau) et 1020nm). De plus, un détecteur multi-couches InGaAs permet la détection thermique à 1020 et 1640nm. Les bandes passantes sont semblables aux instruments du même genre (2nm (UV), 10nm (VIS), 40nm (PIR) (Barreto et al. 2019)). Ce photomètre permet aussi la détection de nuit de par sa sensibilité, toutefois les bandes spectrales dans l'UV mesurent un signal trop faible dans ces conditions. L'angle de vue est de 1.29 degrés et vise la couronne solaire à 3.0 degrés de son centre tout en le suivant par système motorisé et automatisé. Comme ces mesures sont sensibles aux nuages, la prise de 3 mesures espacées de 30 secondes forme des "triplets", desquels l'écart normalisé ( $\frac{MAX-MIN}{MOYENNE}$ ) permet un filtrage des nuages en sélectionnant un sous-ensemble de mesures par valeur seuil (Barreto et al. 2019). La transportabilité de ces instruments permet leur installation sur des navires en grande mer ou encore des avions, dans quel cas il est possible d'obtenir des mesures de



transmission lumineuse au dessus de la troposphère.

### **Photomètre lunaire:**

Suivant le même principe que le photomètre solaire, la lune est utilisée comme source lumineuse, ce qui implique sensiblement la même composition spectrale dans les deux cas (la courbe de réflectance de la Lune (Ohtake et al. 2013) ne présente pas d’absorption complète ou très importante dans l’intervalle de longueurs d’ondes utilisé par les appareils de télédétection de l’AOD). Un intérêt est qu’il est possible d’obtenir une continuité spectrale entre les mesures de jour et de nuit et l’analyse s’en voit simplifiée. Un photomètre lunaire fut compris initialement dans l’appareil Cimel CE-318-U (Barreto et al. 2013), le prototype du CE-318-T, qui permet des mesures d’AOD la nuit par temps dégagé.

### **Photomètre stellaire:**

Il est aussi possible d’utiliser d’autres étoiles que le Soleil en guise de source lumineuse. Les premières mesures stellaires consistaient en la différence de brillance entre une étoile près du zénith et une seconde près de l’horizon. Connaissant leur brillance exoatmosphérique (Ivanescu, O’Neill, and Blanchet 2017) et la masse d’air, il est possible de déterminer l’AOD propre à cette situation. L’utilisation d’un groupe d’étoiles permet d’augmenter la précision de la technique (Alekseeva 1980). Une des premières mesures effectuées selon cette technique visa le couple  $\gamma^2$  Velorum aux raies d’émission du carbone et de l’hélium (Chen, Oliver, and Wood 1987). Plus récemment, une équipe du centre de recherche environnementale d’Andalousie a conçu un photomètre stellaire (Pérez-Ramírez 2008; Pérez-Ramírez 2012) à l’aide d’un télescope et d’un capteur CCD apposé à l’oculaire qu’ils ont pu calibrer à l’aide de mesures de jour du CE-318-T et par la technique des graphiques de Langley (Langley 1903). Une autre équipe (L. Ivanescu 2020), étudiant entre autres les événements de transports d’aérosols au Fjord de Slidre au Nunavut, a réussi à mettre au point un système permettant la mesure d’AOD par photométrie stellaire à l’aide du concept de l’équation 2 à des températures de  $T \leq -40$  en combinant un télescope Celestron C11 et un spectromètre QE65000 de Ocean Optics, obtenant une précision de  $0.7nm$  dans l’intervale  $399.1 - 1159.3nm$  (17 canaux) et une bande passante  $FWHM < 6nm$ . De telles opérations sont toutefois ardues considérant les conditions météorologiques extrêmes de ces régions éloignées (L. Ivanescu et al. 2014). Cette

même équipe a installé un photomètre stellaire à l’Université de Sherbrooke à la station SIRENE qui sera utilisé dans le cadre du projet présenté afin de valider la méthode qui sera mise au point. L’équipe principalement responsable des appareils CIMEL compara les mesures de photométrie stellaire à celles d’un photomètre lunaire (Barreto et al. 2019) dans le cadre d’une évaluation des différentes techniques de mesures AOD. Notamment, comme la méthode de calibrage *in situ* nécessite une atmosphère homogène sur toute son épaisseur, l’équipe a choisi d’utiliser la méthode d’Harrison et Michalsky (Harrison 1994) sur le terrain afin d’effectuer ces comparaisons.

### **LIDAR:**

Par définition, le LIDAR crée un pulse laser de longueur d’onde connue et mesure le ratio d’intensité lumineuse reçu par rétro-diffusion. La version à collisions élastiques de photons avec les particules utilise deux polarisations perpendiculaires afin de déterminer la position et la nature des particules par des tables de propriétés préalablement déterminées reliant le coefficient de rétro-diffusion au coefficient d’atténuation (Fernald 1984). La version Raman, elle, mesure l’inélasticité de la diffusion (soit une atténuation) par collisions de photons LIDAR avec les molécules  $N_2$ ,  $O_2$  et  $H_2O$ , causant une variation de la longueur d’onde propre à chacune, permettant de les distinguer. Aussi, comme pour les techniques RADAR, la mesure du temps d’envoi et de réception du pulse et la connaissance de la vitesse de la lumière dans le milieu permettent de dessiner un profil d’altitude du couvert atmosphérique. Plus tard, il fut découvert que le coefficient de proportionnalité de cette relation est lui-même une fonction de l’atténuation, soit la distance parcourue dans le milieu (Klett 1985). Les deux versions (élastique et Raman) de cet instrument sont souvent utilisées en combinaison avec des photomètres afin de déterminer un ensemble de propriétés des aérosols d’un site d’étude (Baibakov et al. 2015). Récemment, une équipe de la Chine (J. Li et al. 2019) a évalué l’AOD de nuit selon ces assomptions et a pu confirmer une bonne continuité avec les mesures de photométrie solaire. Finalement, une étude (Yin et al. 2019) comparant les instruments Cimel CE-318-T, Microtops II et un LIDAR Raman polarisé a démontré la possibilité de mesures AOD et du coefficient d’Angstrom d’un cycle complet (jour-nuit) sur un bateau lors d’un événement de poussière et de fumée outre mer, ce qui implique que des missions de suivi d’événements d’aérosols en temps réel sont possibles.

### Réseau AERONET:

Les photomètres solaires et lunaires sont utilisés par AERONET, le réseau international de mesures atmosphériques du NASA/Goddard Space Flight Center (Giles et al. 2019; Holben et al. 1998). Ce réseau comporte plus de 84 sites ayant recueilli plus de 10 ans de mesures et plus de 242 sites ayant recueilli plus de 5 ans de mesures (Cuevas et al. 2019). Les données sont étudiées durant toute l'année et sont analysées afin de fournir 3 produits concernant les aérosols: Lev1.0, les données brutes, Lev1.5, un filtrage automatique de nuages et de particules causant une grande variance des mesures et Lev2.0, les données Lev1.5 analysées par des experts de photométrie afin de confirmer les résultats Lev1.5 (Giles et al. 2019). Dans le cadre du présent projet, les données choisies n'ont subi aucune correction (Lev1.0) afin de conserver les mesures d'aérosols souvent filtrées par les algorithmes en fonction (les événements intenses d'aérosols sont confondus avec les nuages) (Shi et al. 2019).

#### 5.1.2 NSB

##### - MESURES DEPUIS LE SOL -

##### **SQM: Sky quality meter**

Étant l'instrument le plus populaire pour les mesures relatives à la pollution lumineuse de par son prix abordable ( $\approx 120\$$ ), le SQM-LE (modèle plus récent et contenant un port réseau ethernet) mesure la brillance du ciel sur un angle de vue de  $80^\circ$  à l'aide d'un capteur TAOS TSL237S (TAOS 2006), soit une diode photoluminescente au silicium contrôlée par un convertisseur courant-fréquence. Le capteur a une sensibilité spectrale de 300 à 1100nm, toutefois un filtre HOYA CM 500nm est appliqué afin de réduire les contributions infrarouges et de centrer le maximum du spectre de sensibilité à 540nm, tout juste la longueur d'onde maximale photopique de l'oeil humain (555nm) et qui coïncide avec le maximum du filtre V du système Johnson-Cousin (Ścieżor and Kubala 2014). Il est possible de voir un ensemble de mesures prisent par différents opérateurs, la plupart des astronomes amateurs, sur plusieurs années via une carte interactive (<http://www.sqm-network.com>). Un grand nombre de travaux font usage de cet appareil pour mesurer la brillance du ciel nocturne (Biggs et al. 2012; Cinzano 2012; Davies et al. 2013; De et al. 2011; Kyba, Ruhtz, et al. 2012; Kyba, Tong, et al. 2015; Kyba, Wagner, et al. 2013; Pun and So 2012; Pun, So, et al. 2014; Puschnig, Posch, and Uthenthaler 2014; Ścieżor and Kubala 2014). Des études des caractéristiques de l'appareil furent

effectuées (Cinzano 2005; Cinzano 2007) afin d’établir les propriétés angulaires ainsi que la sensibilité de l’appareil, suivi d’une troisième (Sánchez de Miguel et al. 2017) qui conclut que l’appareil n’est pas adéquat pour caractériser les contributions spectrales des variations de l’éclairage et finalement des études (den Outer et al. 2015; Ribas et al. 2017) évaluant la stabilité de plusieurs de ces appareils durant une longue période qui démontre que les appareils présentent des variations relatives de 8%.

### **CoSQM: Color Sky quality meter**

Cet appareil (Aubé 2020) est essentiellement un SQM auquel on ajoute une roue à filtres de couleurs Neewer et un serveur Raspberry Pi qui permet la mesure multispectrale dans 5 bandes du visible (rouge, vert, bleu, jaune, transparent). Les filtres utilisés ont été choisis afin de minimiser le coût total de l’appareil afin de le rendre populaire au sein des intéressés de la pollution lumineuse, ce qui a pour effet d’augmenter la taille et la couverture du réseau de CoSQMs. Depuis quelques années, ce réseau d’appareils est en expansion et permet la caractérisation de sites peu étudiés en termes de pollution lumineuse jusqu’à maintenant comme l’appareil est très abordable et simple à construire. Les plans ainsi que toutes les étapes de fabrication sont gratuites et disponibles en accès libre. Les mesures des caractéristiques de l’appareil, telles la sensibilité spatiale, spectrale et le champ de vision sont en cours et font partie intégrante du projet présenté.

#### **5.1.3 Méthode numérique: Modèle radiatif ILLUMINA**

Ce modèle numérique (Aubé et al. 2005; Aubé et al. 2018) élaboré par Martin Aubé en 2005 et amélioré par Alexandre Simoneau (Simoneau 2018) calcule la brillance du ciel en visée directe ainsi qu’en première et seconde diffusion en fonction de la distribution et du type de sources lumineuses présentes, tout en considérant la position, la hauteur et la forme des obstacles présents sur le territoire étudié, sans oublier le traitement de la présence de nuages par couches homogènes qui modifie énormément les résultats (Aubé et al. 2016; Jechow et al. 2017; T. Ścieżor 2020). Plusieurs paramètres d’entrée ainsi qu’un traitement numérique et non basé sur des relations mathématiques analytiques permettent au modèle une précision inégalée par les autres modèles de pollution lumineuse existants (Kocifaj 2007; Kocifaj 2018) et Netzel (Netzel et al. 2018) au prix d’un temps de calcul beaucoup plus important (Aubé et

al. 2005). Ce modèle est en cours de conversion vers le langage python en version GPU qui diminuera énormément le temps de calcul. D’ailleurs, ce modèle fut tout récemment accepté en tant que modèle officiel permettant de caractériser la pollution lumineuse en Australie de par sa précision de résultats. L’un des intrants de ce modèle est l’AOD des particules au site étudié, motivant son utilisation dans ce projet afin d’obtenir une relation AOD-ZNSB de par son inversion.

## 5.2 Relation AOD-ZNSB

À ce jour, très peu de travaux traitent de la possibilité de détecter les propriétés de l’atmosphère à l’aide de la présence de pollution lumineuse. En 2005, un premier travail (Aubé et al. 2005) a démontré la possibilité d’obtenir l’AOD par inversion du modèle ILLUMINA combiné aux mesures du spectromètre SAND<sup>3</sup>. La technique n’est valable que si le modèle numérique décrit précisément l’hétérogénéité des sources lumineuses et du site de modélisation (distribution spatiale, spectrale, réflectances du sol, topographie, obstacles) (Aubé 2015). En 2009, un second travail de la même équipe (Aubé 2009) a démontré des résultats intéressants qui présentent une tendance linéaire pour des valeurs d’AOD de 0.04 à 0.1. De plus, en utilisant le modèle semi-empirique ainsi formé, une évaluation de la continuité des mesures AOD de jour (photomètre solaire) et de nuit (SAND) confirme que la technique démontre un potentiel intéressant.

Très récemment, une autre équipe (Kocifaj et al. 2020) a utilisé les mesures multispectrales du radiomètre VIIRS à bord du satellite Suomi-NPP afin d’obtenir la fonction de distribution de la taille des aérosols d’une colonne d’air. En observant des villes de petites tailles et très localisées, ils ont pu déterminer un rayon maximal à l’intérieur duquel toute émission de rayonnement serait causé par l’éclairage artificiel de cette ville. Ainsi, toute brillance perçue à l’extérieur de ce rayon est causée par la diffusion des particules et leur analyse spectrale permet de reconnaître la taille des particules responsables de cette contribution. Toutefois, comme le satellite n’est pas géostationnaire, il n’est pas possible d’obtenir des mesures en tout temps des aérosols pour un site choisi (considérant qu’une grande partie des mesures sont déjà retirées dû à la présence de nuages). De plus, la résolution spatiale de 750m limite

---

<sup>3</sup>Décrit en annexe

les mesures des variations à petite échelle, ce qui motive l’élaboration d’une autre technique de mesure.

De manière très semblable à la technique proposée dans ce travail, le radiomètre à bande étroite ZEN(Almansa et al. 2017) fabriqué par l’équipe d’Émilio Cuevas à Tenerife mesure la ZSB (*zenith sky brightness*), soit la brillance de jour) et inverse le modèle radiatif LibRadtran afin de comparer les mesures de brillance à l’AOD dans une table de valeurs. Leurs résultats sont prometteurs et démontrent notamment que les erreurs sont de l’ordre de 10% par rapport aux données AERONET Level 2.0 (soit filtrées pour la présence de nuages et vérifiées par un interprète de données). Il faut noter que les particules principalement présentes dans cet environnement sont composées de poussière de sable, ce qui peut être bien différent selon le site d’étude et pourrait occasionner des erreurs supérieures à celle obtenue. Il n’en est pas moins que la méthode confirme l’intérêt de recourir à de telles pratiques afin d’obtenir les mesures AOD de nuit, ce qui motive grandement le projet présenté.

## 6 Cadre expérimental

Le travail présenté est principalement exécuté à Tenerife, situé aux Îles Canaries dans l’océan atlantique. Quatre appareils CoSQMs y sont installés à différents sites qui présentent des conditions atmosphériques et de brillance du ciel très différentes les unes des autres. En effet, le premier est installé dans la ville capitale de Tenerife, Santa-Cruz-de-Tenerife, sur le toit d’un immeuble de 10 étages à quelques mètres d’instruments de mesures atmosphériques, tel un photomètre CIMEL CE318-T et un ballon atmosphérique est lancé une fois par jour afin de mesurer les propriétés climatiques en altitude. Cet endroit est le lieu de travail principal de l’équipe d’Emilio Cuevas, directeur du centre météorologique et atmosphérique AEMET (*Agencia Estatal de Meteorología*) ce qui implique que les appareils qui s’y trouvent sont rapidement ajustés et les problèmes techniques sont aisément corrigés grâce à l’accessibilité et l’expertise de cette équipe quant aux instruments de télédétection. Le site est en bordure de mer et est orienté vers le Maroc, ce qui le rend habituellement l’un des premiers lieux affectés par des tempêtes de sable, le calima (Milford et al. 2020), qui représentent d’importants événements de transport d’aérosols sur de grandes distances. Aussi, comme ce site est situé

dans une ville très peuplée ( $1400/km^2$ ), les sources de pollution lumineuse y sont importantes, causant une brillance du ciel nocturne plus grande qu’aux deux autres sites, eux plus éloignés des villes. Le second appareil est installé à l’observatoire astronomique de Teide, à 2390m d’altitude, au dessus d’une couche d’inversion de température qui cause un plafond nuageux tout juste sous l’observatoire, permettant des observations astronomiques de qualité. Sur le même toit où est installé le CoSQM se trouve un appareil de mesure de brillance du ciel nommé IYA Light Sensor (Hänel et al. 2018) qui consiste en une cellule photoélectrique très sensible et résistante aux intempéries. Ce site permet entre autres la comparaison des mesures CoSQM à cet appareil, ce qui est intéressant vu les années d’activités de l’appareil. Finalement, le troisième et dernier site se situe à quelques dizaines de mètres du sommet du volcan Teide, la plus haute montagne de l’Espagne, où un CoSQM est installé à l’extérieur du bâtiment servant de camp de base multifonctionnel. Un petit local y est aménagé afin de connecter les appareils présents et d’analyser des échantillons de mesures atmosphériques et du sol du Teide, constituant un laboratoire miniature. Tout comme à Santa-Cruz, des ballons y sont lancés mais à une fréquence plus faible vu l’accessibilité réduite de ce site (1h en voiture, 0.5h téléphérique depuis Santa-Cruz). Ce troisième site est le moins pollué en termes de pollution lumineuse et permet une comparaison intéressante avec les deux autres sites. Plus récemment, en début de l’année 2020, un 4e appareil à Tenerife fut installé au centre atmosphérique d’Izana, aussi opéré par la même équipe de Cuevas, où une multitude d’appareils dernier-cri sont calibrés avec leurs version maître (entre autres les appareils CIMEL). Les variations de mesures observées entre ce site et l’observatoire permettront de caractériser la relation AOD-ZNSB à très faible distance. De plus, un 5e appareil a été installé à l’université de Sherbrooke à la station de mesures SIRENE afin de caractériser la pollution lumineuse du Mont-Bellevue, spécifiquement la zone du campus de l’UdeS mais surtout dans le but d’utiliser le photomètre stellaire présent pour calibrer et confirmer la méthode de détermination de l’AOD par la brillance du ciel (le photomètre se trouve sous un dôme à moins de 2 mètres du CoSQM sur le toit du bâtiment).

Ce projet fait intervenir plusieurs données d’appareils distincts afin d’en trouver les relations et de valider certaines hypothèses. Premièrement, les données des appareils CoSQM servent à quantifier la brillance du ciel nocturne au zénith aux différents sites dans 5 bandes spec-

trales du visible. Préalablement à leur installation, chaque CoSQM est étalonné par rapport à un instrument maître dans des conditions semblables à celles de Tenerife. Ensuite, les données AERONET (Giles et al. 2019; Holben et al. 1998), constituées de mesures de photomètres solaires et lunaires, traitent de l'AOD et du coefficient d'Angstrom des particules atmosphériques, entre autres selon le modèle bimodal. Au site de Sherbrooke, le photomètre stellaire est en utilisation limitée dû aux installations peu propices à des mesures automatisées (système de contrôle datant et entretien cessé) mais des mesures seront toutefois effectuées manuellement pendant quelques nuits à la fin du projet pour confirmer la méthode recherchée de façon plus précise et une remise sur pied de l'automatisation des mesures sera tentée. Aussi, un ensemble de librairies de traitement de données en langage Python est utilisée (tout le travail est accompli dans ce langage), dont PyEphem qui permet la détermination précise de la position de la lune dans le ciel en fonction des coordonnées de latitude et de longitude permettant de sélectionner seulement les points de mesure qui limitent sa contribution à la brillance du ciel nocturne.

## 7 Approche méthodologique

Afin d'obtenir une relation à grande corrélation entre l'AOD et la ZNSB aux trois sites d'étude de l'île de Tenerife, il est essentiel d'effectuer un traitement adéquat et méticuleux des différentes données décrites à la section précédente. En débutant, comme l'utilisation des instruments CoSQM est récente, certaines modifications et tests ont été effectués lors des premiers mois précédant et suivant l'installation des appareils sur Tenerife impliquant une vérification de la structure des données, des intervalles de temps entre les redémarrages des appareils ainsi que les techniques empiriques de positionnement et de vérification de la position des filtres spectraux. Ensuite, la première réduction de données est effectuée par un filtrage des séries de points de mesures présentant une grande variance, dictée principalement par la présence et le passage de nuages non-uniformes. Cette étape est cruciale afin de permettre une relation à haut coefficient de corrélation comme les nuages peuvent rapidement causer des variations de l'ordre de 4 magnitudes selon un traitement préliminaire des mesures CoSQM, d'autant plus que leur effet a une forte dépendance spectrale (Kyba, Ruhtz, et al. 2012). D'autant plus, un second filtre de variance selon différents paramètres permet d'évaluer



les plateaux de valeurs de brillance dues à un couvert nuageux constant sur un petit intervalle de temps, toutefois plus grand que le premier filtre de variance. Ainsi, plusieurs régimes sont retirés de la relation AOD-ZNSB ne laissant que les mesures comportant le moins de variables à haute variance de résultats. Ces "trous" de mesures pourraient être traités éventuellement mais sont acceptés à ce stade du projet considérant que ce travail vise à établir une preuve de concept de la technique présentée. Troisièmement, la présence de la lune doit être considérée comme elle est une des principales sources de lumière naturelle nocturne contribuant à la ZNSB (lorsqu'au dessus de l'horizon) et dont l'effet doit être négligeable dans les conditions de comparaison AOD-ZNSB considérées. En effet, la brillance de la Lune devrait être modélisée afin de retirer sa contribution aux mesures CoSQM dans l'optique de déterminer une unique relation AOD-ZNSB. Quelques modèles et méthodes de caractérisation de brillance du ciel d'origine lunaire (Coughlin, Stubbs, and Claver 2016; Davies et al. 2013; Krisciunas and Schaefer 1991; Yao et al. 2013), seront comparés aux données afin d'évaluer la possibilité de corriger les nuits avec présence de Lune (en limitant la proximité de la lune au zénith). Ainsi, en utilisant la librairie PyEphem, la position de la lune dans le ciel est obtenue et un filtre binaire est appliqué afin de réduire les données: toute mesure pour laquelle la lune est plus haute que l'horizon astronomique est retirée de l'analyse. Si ces traitements sont bien effectués, la variance des mesures restantes ne devraient être due (mis à part les fluctuations dues aux aérosols) qu'aux variations temporelles de l'éclairage anthropique et, en moins grande proportion, les sources naturelles de radiance du ciel dont les plus importantes sont la lumière zodiacale (visible), le airglow (bleu près de l'horizon, rouge/IR près du zénith) (Khomich, Semenov, and Shefov 2008) et la brillance des étoiles (tout le spectre) (Noll et al. 2012). Ces contributions supplémentaires ne seront pas abordées dans ce travail. Finalement, les habitudes d'éclairage des habitants de Tenerife seront étudiées en comparant les mesures de ZNSB en fonction de l'heure de la nuit, le jour de la semaine, le mois ainsi que la saison afin d'extraire les variations d'origine anthropique.

Suivant ces traitements, les données AOD des photomètres lunaires et solaires sont disponibles sous différentes formes: brutes (lev10), filtrées numériquement pour les nuages et les aérosols (lev15) et filtrées par un expert du domaine atmosphérique (lev20). Il est important de comprendre le sens des données obtenues à chaque niveau afin de ne pas perdre d'informations

clefs des aérosols, souvent filtrés par les niveaux supérieurs ainsi que les différences entre les produits AERONET (O'Neill, Eck, Smirnov, and Holben 2006). Le traitement ici proposé implique de sélectionner les mesures n'ayant subies aucun filtrage ou réduction suite aux conseils de Norman T. O'Neill. Toutefois, malgré le fait que les données AOD soient brutes, il est considéré que les données CoSQM, référencées par l'heure précise de la prise de mesures, permettent du même coup le filtrage des données AOD par les mêmes arguments. Il reste néanmoins un problème majeur: Les mesures de photométrie lunaire ne sont possibles qu'en présence de lune ce qui rend impossible la corrélation AOD-ZNSB sans lune en fonction des données AERONET. Il est alors nécessaire d'user d'arguments de continuité entre les dernières mesures de photométrie solaire de jour ainsi que des premières mesures de ZNSB de nuit, post-crêpuscule astronomique. Aussi, il est possible d'utiliser les mesures de photométrie lunaire lorsque celles-ci sont prises très tôt ou très tard, avec respectivement des mesures de ZNSB prises très tard ou très tôt. Enfin, il est important d'évaluer la continuité des mesures AOD de jour en jour afin de conclure si les variations ne sont pas importantes la nuit lors des mesures de ZNSB, sans quoi la relation AOD-ZNSB ne sera représentative des réelles propriétés des aérosols nocturnes effectivement mesurés. Afin d'effectuer cette évaluation, une analyse automatique des valeurs AOD imposera une réduction des données si les écarts entre les dernières valeurs AOD au crépuscule et les premières du lendemain matin dépassent une valeur seuil qui reste à déterminer. Néanmoins, ces nuits de mesures à grande variation ne sont pas écartées, mais bien utilisées afin de déterminer si les mesures de ZNSB suivent au moins la tendance des résultats AOD des jours associés, augmentant le nombre de points de mesure utiles.

Ces traitements définissent la méthode de base de réduction des données valide pour tout site. Ainsi, les trois sites à l'étude seront soumis à ces mêmes traitements (l'observatoire et le centre atmosphérique d'Izana présentent des conditions semblables dû à leur proximité (1.6km)). Toutefois, il est attendu que la relation propre à un site implique différents coefficients déterminés de manière empirique selon l'allure des courbes de corrélations AOD-ZNSB. En effet, comme la pollution lumineuse est plus grande à Santa-Cruz, il est attendu que les valeurs de ZNSB en magnitudes soient plus faibles (soit une brillance plus intense) pour les mêmes valeurs AOD changeant ainsi la relation obtenue. Un second point est que

le profil vertical des aérosols (le type de particules peut dépendre de la hauteur dans certaines conditions) implique qu'il soit possible d'obtenir des relations qui diffèrent aux sites en altitude des sites au niveau de la mer. Finalement, comme le but final du projet est d'obtenir une méthode de mesure d'AOD simple et abordable, il est important de comprendre quels facteurs influencent la relation AOD-ZNSB afin de la généraliser à tout site de caractérisation. Pour y parvenir, l'inversion d'un modèle numérique de pollution lumineuse par tracé de rayon (Illumina, **aubeRestoringNightSky2020**; Aubé et al. 2018) prenant en intrant l'AOD des particules présentes au site d'étude devrait permettre de généraliser la méthode si les résultats préliminaires s'avèrent concluants. Le cas échéant, en posant une valeur d'AOD et des conditions de simulations semblables à celles des mesures CoSQM, il est possible de rechercher la valeur d'AOD donnant le plus faible écart entre la simulation et les mesures. Ainsi, il serait même possible d'effectuer une étude à variables multiples par apprentissage automatique de l'influence de certains paramètres d'Illumina sur la relation AOD-ZNSB créant une inversion consécutive du modèle. D'autant plus, l'impact de la neige ou des nuages se prête bien à ce type d'approche de résolution de problème si une base de données de grande taille est disponible, ce qui n'est malheureusement pas encore le cas.

## 8 Résultats escomptés

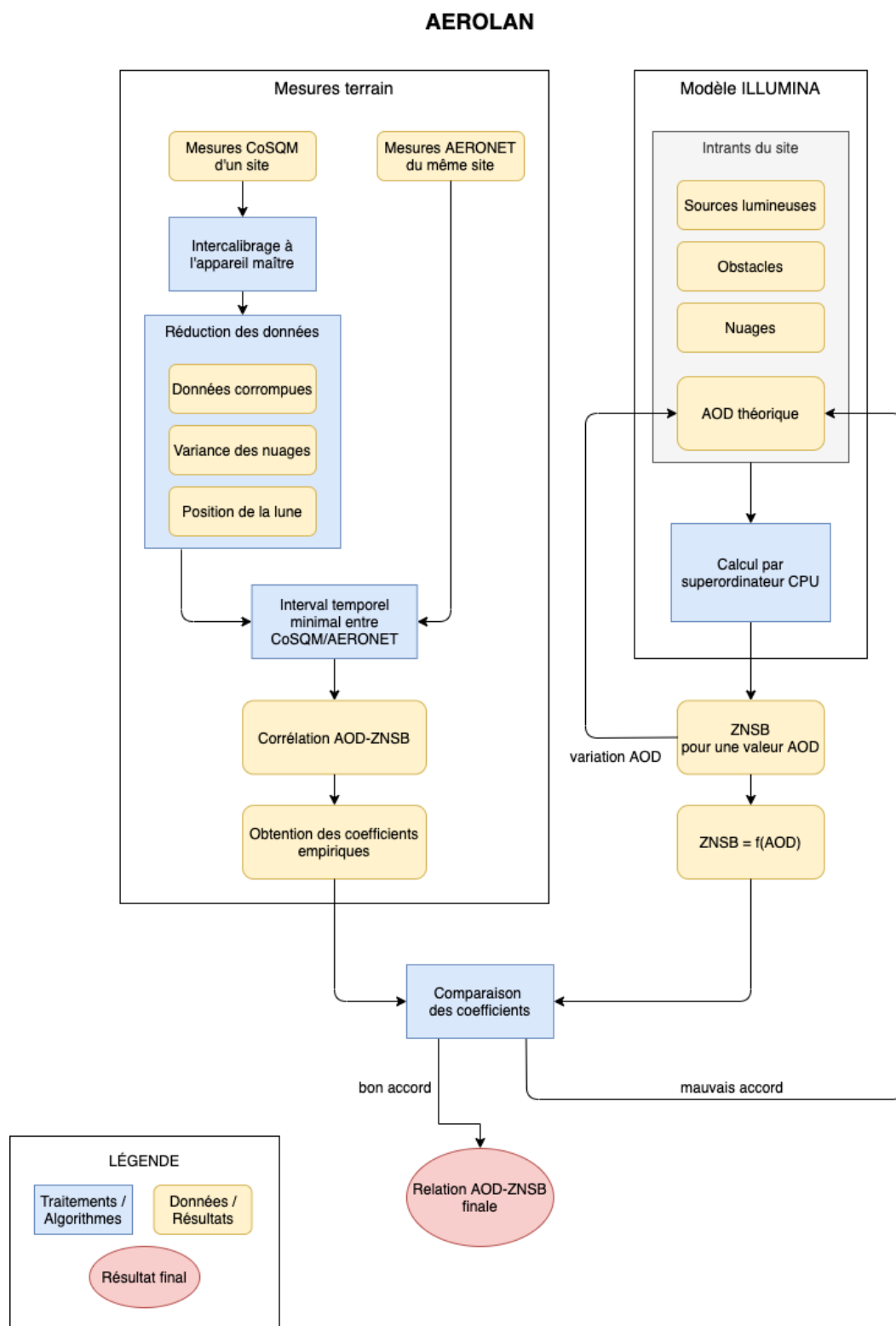
Le résultat principal escompté du projet est d'obtenir une relation entre l'AOD et la ZNSB pour des cieux sans lune et sans nuage qui soit suffisamment constante afin d'observer une continuité entre les mesures de jour et de nuit pour des conditions stables de concentrations d'aérosols. La relation visée devrait être dépendante de la longueur d'onde, permettant un accord spectral aux mesures AERONET pour l'extraction du coefficient d'Angstrom. Il serait aussi souhaitable que la relation soit similaire de site en site pour des conditions de pollution lumineuse similaires afin de pouvoir en extraire son influence sur les mesures. En effet, si ces conditions impliquent des valeurs de brillance semblables pour des sites éloignés spatialement, il sera possible d'inverser le modèle de pollution lumineuse afin d'obtenir des prévisions de valeurs d'AOD et, du même coup, les facteurs principaux influençant la relation AOD-ZNSB seront considérés comme bien compris. À l'inverse, ceci permettra de démontrer qu'il reste du travail à accomplir quant à la compréhension de l'interaction entre les aérosols et la brillance

du ciel nocturne. D’un point de vue spectral, il est visé que la composition des aérosols puisse être mesurée vu la présence de filtres de couleurs des CoSQMs permettant la mesure du coefficient d’Angstrom. Il va de soi que si le premier résultat est obtenu, celui-ci suivra naturellement et il est attendu que cette dépendance soit en accord avec les mesures publiées par AERONET. Finalement, malgré la possibilité de résultats peu concluants concernant la relation AOD-ZNSB, des méthodes de traitements des données CoSQM ainsi que des outils d’affichage et de correction des erreurs de mesures seront tout de même mis au point. Ceci permet une utilisation plus accessible de ces appareils et permet aux scientifiques l’accès à un nouvel appareil insitu et aux données qui s’accumulent déjà depuis quelques années. De ces méthodes, il en ressortira une méthode de caractérisation de la pollution lumineuse pour tout site en fonction des habitudes d’éclairage, un algorithme de réduction des données en fonction de la variance attribuée à la présence de nuages, l’application d’un filtre de présence de la lune et finalement un algorithme de retrait des données corrompues.

## 9 Retombées de la recherche

Comme il est constaté dans la section 5.2, très peu de travaux démontrent l’intérêt de prendre avantage de la présence de pollution lumineuse afin de mesurer d’autres grandeurs physiques. Cette idée, utilisée conjointement avec le réseau de CoSQMs, apporterait d’une part une solution simple, peu dispendieuse et offrant la possibilité de mesures AOD la nuit dans des conditions sans couvert nuageux et en présence de pollution lumineuse et améliorerait à l’inverse la compréhension de l’impact des aérosols sur la pollution lumineuse. Ce second point est moins abordé ici mais reste néanmoins important quant à l’impact de ce travail sur la compréhension des causes naturelles de variations de la brillance du ciel et celles dues à la présence anthropique. De plus, cette étude fait intervenir les habitudes d’éclairage sur Tenerife, ce qui permet d’une part d’améliorer la connaissance des observations astronomiques et d’une autre part d’évaluer quels changements en termes d’éclairage seraient les plus pertinents en termes de réduction de la pollution lumineuse permettant de confirmer les récents travaux à ce sujet (M. Aubé et al. 2020).

## 10 Organigramme, échéancier



Légende		Complété (1)	Planifié (2)	Entamé (3)			
Description	W2019	S2019	A2019	W2020	S2020	A2020	W2021
<b>Instrumentation</b>							
Fabrication des appareils							
Intercalibrage							
Dark frame							
Linéarité							
Sensibilité angulaire spatiale							
Vérification du comportement des filtres ("red bug")							
Installation des 3 premiers CoSQMs (Sta-Cruz, Obs. Izana, Pico del Teide)							
Installation des CoSQMs subséquents (atmo center Izana, SIRENE)							
Débuggage des connexions de la station SIRENE (firewall network hub)							
Wiki - corrections et ajouts, précisions							
<b>Traitement des données empiriques</b>							
Évaluation préliminaire des mesures							
Algorithme de détection d'erreurs de prises de mesures (princ. Teide)							
Réductions de données:							
Filtrage des nuages (plafond bas, variance rapide)							
Filtrage des nuages (plafond haut, variance faible)							
Réduction de présence de Lune (crépuscule astronomique -> PyEphem)							
Réduction de présence de Voie Lactée (PyEphem)							
Écriture d'un site web de visualisation de données							
Détermination AOD-ZNSB							
Continuité des mesures (Photomètre solaire <-> CoSQM)							
Évaluation de modèles de brillance lunaire							
Évaluation de modèles de brillance de Voie Lactée							
Confirmation de la méthode par photométrie stellaire (SIRENE)							
Réparation/mise en service du photomètre stellaire							
Choix d'étoiles cibles et de nuit de mesure propice							
<b>Inversion numérique du modèle ILLUMINA V2</b>							
Détermination des intrants (A. Simoneau et al.)							
Types et propriétés des aérosols							
Détermination de la fonction coût							
Évaluation de la sensibilité au couvert nuageux							
<b>Rédaction</b>							
Revue littérature							
NSB (ZNSB, NNSB), coefficient d'Angstrom							
Aérosols (coarse/fine modes)							
Nuages et contributions naturelles à la ZNSB							
Méthodes antérieures							
Impacts biologiques,							
Ciel étoilé							
Modèle ILLUMINA V2							
Écriture mémoire							
Abstract							
Introduction							
Cadre théorique							
Méthodologie							
Présentation des résultats							
Analyse et discussion							
Conclusions							
Remerciements							
Écriture Article: AOD from night sky zenithal brightness measurements							
<b>Cours</b>							
TEL701 - Physique de la télédétection							
TEL703 - Traitements d'images							
TEL724 - Stage en milieu professionnel							
TEL730 - Séminaire de méthodologie							
TEL800 - Séminaire de maîtrise							
TEL850 - Présentation des résultats							

## 11 Annexe

### 11.1 Théorie de base

Premièrement, l'AOD découle du concept d'atténuation de la lumière traversant la matière, décrit par la loi de Beer-Lambert(Beer 1852; Lambert 1760) qu'on applique à un gaz de particules:

$$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = e^{-\tau} \quad (1)$$

où  $T$  est le coefficient de transmission du flux lumineux,  $\Phi_t$  est le flux lumineux transmis,  $\Phi_i$  le flux lumineux incident et  $\tau$  l'AOD dans une bande spectrale donnée. Dans le cas de l'atmosphère, chaque contribution d'absorption et de diffusion peut être multipliée, soit:

$$T_{atmo} = e^{-m(\tau_a + \tau_g + \tau_{RS} + \tau_{NO_2} + \tau_w + \tau_{O_3} + \tau_r + \dots)} \quad (2)$$

dont la définition des indices est:  $a$  les aérosols,  $g$  les gaz mélangés uniformes ( $CO_2$ ,  $O_2$ ),  $RS$  les composantes causant de la diffusion Raman,  $NO_2$  le principal polluant anthropique,  $w$  l'absorption moléculaire de l'eau,  $O_3$  l'ozone et  $r$  les contributions de diffusion de Rayleigh pour les molécules  $O_2$  et  $N_2$ . Ici,  $m$  est la masse d'air relative ( $m_{\theta=0} = 1$ ), approximée à  $\frac{1}{\cos\theta}$  dans le cas d'un angle zénithal  $\theta$  faible. La profondeur optique des aérosols n'est alors pas une distance, même si elle tend vers 0 pour une distance de parcours lumineux qui tend vers 0. L'épaisseur optique est reliée au coefficient d'atténuation du matériau ou du milieu par la relation:

$$\tau = \int_0^l \beta(z) dz \quad (3)$$

où  $l$  est l'épaisseur de substance à traverser ( $m$ ),  $\beta(z)$  le coefficient d'atténuation de cette substance ( $m^{-1}$ ) et  $z$  la position dans la substance ( $m$ ). Ainsi, il est possible de traiter des substances dont les propriétés optiques varient selon la hauteur, ce qui peut causer différentes substances ou combinaisons de substances à produire la même épaisseur optique. Afin de discerner ces différentes substances, la seconde grandeur d'intérêt intervient: le coefficient d'Angstrom(Ångström 1929), qui caractérise l'aérosol en décrivant la nature spectrale de l'AOD en fonction d'une longueur d'onde de référence. Partant du ratio des AODs aux différentes longueurs d'ondes:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \quad (4)$$

avec

$$\alpha = -\frac{\ln(\frac{\tau_{\lambda_1}}{\tau_{\lambda_2}})}{\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})} \quad (5)$$

qui implique que ce coefficient est faible pour des particules dont l'AOD change peu avec la longueur d'onde, soit des particules de grande taille, et inversement. À l'aide de ce concept quantifiable, il est possible de déterminer la taille des aérosols si deux mesures AOD à longueurs d'ondes différentes sont effectuées.

## 11.2 Méthodes de mesure AOD supplémentaires

### Satellites:

Des radiomètres à bord de satellites permettent aussi la mesure de l'AOD si les conditions sont favorables. En effet, le satellite *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) lancé en 1999 permet la mesure d'AOD avec une incertitude de  $\pm 0.05$  (Barreto et al. 2019) en visant des zones sombres au sol qui deviennent plus claires s'il y a une grande concentration d'aérosols (Shi et al. 2019). La résolution spatiale des mesures AOD est initialement de 10km, tandis qu'un algorithme de traitement des données nommé MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*) permet d'augmenter cette résolution à 1km (Chudnovsky et al. 2014). Aussi, le satellite MeteoSAT Second Generation (MSG) porte l'appareil nommé SEVIRI (Schmid 2000) qui contient 12 bandes spectrales dont 8 se situent dans l'infrarouge thermique afin de caractériser la température des nuages avec une résolution de 1km pour le visible et 3km pour l'infrarouge, avec une période de mesures de 15 minutes. Une équipe de Pologne a réussi à utiliser un algorithme de traitement de données (Zawadzka et al. 2018) qui, dans des conditions chaudes et stables, permet de mesurer l'AOD à partir des mesures télédéteçtées. D'une autre façon, la plateforme spatiale CALIPSO (*Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation*) contient un appareil lidar nommé CALIOP (*Cloud Aerosol LIidar with Orthogonal Polarization*) qui mesure des produits AOD depuis 2006, dont les particularités sont décrites par l'équipe de mise en oeuvre (Kacenelenbogen et al. 2011). Finalement, une étude de la qualité de l'extraction de la quantité de particules de taille  $2.5\mu m$  ( $PM_{2.5}$ , *particle matter*), tel que fait par (van Donkelaar Aaron et al. 2010) à une résolution de  $10km^2$  à partir des valeurs d'AOD (Li, Carlson, and Lacis 2015) et démontre que la relation  $AOD - PM_{2.5}$  est très sensible à position géographique (dépend du type de



site) et a une forte influence du profil vertical des aérosols, tel qu’il est attendu.

### 11.3 Méthodes de mesures de ZNSB supplémentaires

#### **SAND: Spectrophotometer for Aerosol Night Detection**

Le SAND(Aubé 2009; Hänel et al. 2018) permet la mesure spectrale nocturne du ciel au zénith. La dernière version de l’instrument est composé d’un spectromètre SBIG DSS-7 combiné à un capteur CCD ST-402 recouvert d’un dôme en acrylique. Plusieurs versions ont vu le jour à travers les années et la dernière est toujours en service, toutefois les travaux de développement concernant cet appareil ont maintenant cessés. Les premières données utilisées permettant une relation AOD-ZNSB furent obtenues à l’aide de cet appareil (Aubé et al. 2005).

#### **All-Sky DSLR:**

Il est naturel de considérer la possibilité de mesures de brillance du ciel par l’utilisation d’appareils photographiques typiques dont la résolution ne cesse d’augmenter avec les années, soit les appareils DSLR (*Digital single lens reflex*). Une fois calibrés en intensité, réponse spectrale et champ de vision, des photographies au zénith à grand angle (*All-sky*) permettent la quantification de la pollution lumineuse du site d’étude. Un exemple de produit commercial conçu par A. Mojar (Kolláth et al. 2017) permet la mesure multispectrale de la brillance du ciel dans les canaux standards de la caméra. Grâce au grand angle, il est facile de déterminer les conditions de pollution lumineuse d’un site d’observation à l’aide d’une seule image. Une autre application du même type a été démontrée par la même équipe en 2019(Jechow et al. 2019). Finalement, une comparaison de performances des différentes approches de ce type démontre une grande variation entre les résultats en fonction de l’appareil utilisé, impliquant qu’une uniformisation est nécessaire (Haenel 2015). Toutefois, l’instrument ASTMON (*All sky extinction monitor*) (Aceituno et al. 2011) est celui qui offre la meilleur corrélation aux mesures SQM-L préalablement utilisées. Basé sur l’instrument EXCALIBUR(Sánchez et al. 2007), le ASTMON est un instrument de mesure plein champ multispectral qui comporte des filtres Johnson (UVBRI) et mis au point afin de corriger et de caractériser quantitativement les conditions atmosphériques d’observations (courbe d’extinction et brillance du ciel nocturne) à l’observatoire astronomique Calar Alto de la ville d’Almería en Espagne. Le capteur

est un CCD KODAK KAF-8300 de 8.3MP qui définit une résolution de  $3.8'$  par pixel. Une image est acquise du ciel étoilé avec un temps d'intégration permettant le calibrage à l'aide des étoiles les plus brillantes (par exemple VEGA) et permet alors la détection de la brillance des autres étoiles, permettant une mesure quantitative de l'atténuation de l'atmosphère au moment de la mesure et à l'angle de visée. Une capacité importante de l'appareil est qu'il permet d'identifier avec précision la présence de nuages sur tout les angles solides, donc permet une mesure de leur mouvement. Ceci permet, entre autres, l'optimisation des moments de mesures choisis.

## VIIRS

Le capteur multispectral DNB (*Day Night Band*) (Baugh et al. 2013; C. D. Elvidge et al. 2017) du satellite VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) permet la mesure de la radiance au nadir depuis l'espace, ce qui informe du même coup des interactions avec l'atmosphère. D'ailleurs, l'atlas mondial de pollution lumineuse (Falchi et al. 2016) est basé sur les images acquises par ce capteur. Toutefois, tous les satellites ne sont pas adéquats pour ce genre de mesures, tel qu'il a été évalué dans un ouvrage reconnu (Elvidge et al. 2013), qui précise les avantages de l'utilisation du VIIRS-DNB comparé au DMSP-OLS (*Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner*) préalablement utilisé pour des mesures hors-atmosphère de radiance au nadir qui forment la base de données du premier atlas mondial de pollution lumineuse (Cinzano et al. 2001). De ces avantages, les principaux sont la résolution spatiale ( $0.75\text{km}$  vs  $2.7\text{km}$  ( $5\text{km}$  selon Elvidge et al.) pour le mode *smooth*) ainsi que la sensibilité (DNB utilise un CCD vs OLS qui utilise un tube photomultiplicateur, soit beaucoup moins sensible à de faibles intensités lumineuses). Ces avantages s'avèrent cruciaux pour l'analyse des populations, de la pollution lumineuse et de tout autre conséquence liée à la création de lumière anthropique. D'ailleurs, ces avantages pourraient permettre de déterminer la nature des sources lumineuses au sol, intérêt important pour l'application du modèle ILLUMINA, décrit ci-après, et son inversion qui nécessite la connaissance des lampes environnantes et leur spectre. Il faut mentionner que les bandes spectrales des deux capteurs satellitaires ne sont pas représentatives de la vision humaine, or la pollution lumineuse visible n'est pas représentée par les images VIIRS-DNB et DMSP-OLS.

**MINLU:**

À l'aide de 3 caméras soutenues par un drone(Fiorentin et al. 2019), des mesures de brillance en provenance du sol peuvent être effectuées avec une bonne précision. De plus, les auteurs mentionnent la possibilité d'installer un spectrophotomètre sur le dessus de l'appareil afin d'effectuer des mesures de brillance du ciel nocturne hyperspectrales vers le zénith. Les travaux nécessaires à ces mesures hyperspectrales sont toujours à faire à ce jour.

**11.4 Note sur les unités**

Le domaine de la radiométrie et de la photométrie utilise une multitude d'unités différentes pour des concepts semblables et il faut être conscient des unités considérées et de ce qu'implique le recours à des conversions entre elles afin d'éviter la confusion (Rea 2007).

## Références

- Aceituno, J. et al. (Aug. 2011). “An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON”. en. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 123.907, p. 1076. ISSN: 1538-3873. DOI: 10.1086/661918.
- Alekseeva, G. A. (1980). “The Determination of Atmospheric Extinction by the Stellar Magnitude Differences Method in Stellar Spectrophotometry”. In: *Izvestiya Glavnoj Astro-nomicheskoy Observatorii v Pulkove* 198, pp. 18–21.
- Almansa, A. F. et al. (2017). “A New Zenith-Looking Narrow-Band Radiometer-Based System (ZEN) for Dust Aerosol Optical Depth Monitoring”. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 10.2, pp. 565–579. DOI: 10.5194/amt-10-565-2017.
- Ångström, A (1929). “On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air”. In: *Geografiska Annaler* 11, pp. 156–166. ISSN: 1651-3215. DOI: 10.2307/519399.
- Aubé (2003). “Modélisation de l’évolution Spatiale et Temporelle de l’épaisseur Optique Des Aérosols à l’échelle Régionale”. PhD thesis. UdeS.
- (2009). *Using Artificial Sky Glow to Retrieve Night Time Aerosol Optical Depth*.
- (May 2015). “Physical Behaviour of Anthropogenic Light Propagation into the Nocturnal Environment”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370.1667, p. 20140117. DOI: 10.1098/rstb.2014.0117.
- (Apr. 2020). *CoSQM User Manual*.
- Aube et al. (July 2013). “Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility”. en. In: *PLOS ONE* 8.7, e67798. ISSN: 1932-6203. DOI: 10.1371/journal.pone.0067798.
- Aubé et al. (Aug. 2005). “Light Pollution Modelling and Detection in a Heterogeneous Environment: Toward a Night-Time Aerosol Optical Depth Retrieval Method”. en. In: *Optics & Photonics 2005*. Ed. by Hung-Lung A. Huang and Hal J. Bloom. San Diego, California, USA, p. 589012. DOI: 10.1117/12.615405.
- (Sept. 2016). “The Spectral Amplification Effect of Clouds to the Night Sky Radiance in Madrid”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Using Remote Sensing to Better Understand Light Pollution (Light Pollution Theory Modelling

- and Measurements 2015) 181, pp. 11–23. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.01.032.
- Aubé et al. (May 2018). “New Features to the Night Sky Radiance Model Illumina: Hyperspectral Support, Improved Obstacles and Cloud Reflection”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 211, pp. 25–34. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.02.033.
- Aubé, Martin et al. (May 2020). “Restoring the Night Sky Darkness at Observatorio Del Teide: First Application of the Model Illumina Version 2”. In: *arXiv:2005.14160 [astro-ph]*. arXiv: 2005.14160 [astro-ph].
- Baibakov et al. (Sept. 2015). “Synchronous Polar Winter Starphotometry and Lidar Measurements at a High Arctic Station”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 8.9, pp. 3789–3809. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-8-3789-2015.
- Bará et al. (Apr. 2020). “Magnitude to Luminance Conversions and Visual Brightness of the Night Sky”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 493.2, pp. 2429–2437. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/staa323.
- Barreto et al. (Mar. 2013). “A New Method for Nocturnal Aerosol Measurements with a Lunar Photometer Prototype”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 6.3, pp. 585–598. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-6-585-2013.
- (Feb. 2016). “The New Sun-Sky-Lunar Cimel CE318-T Multiband Photometer &ndash; a Comprehensive Performance Evaluation”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 9.2, pp. 631–654. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-9-631-2016.
- (Apr. 2019). “Evaluation of Night-Time Aerosols Measurements and Lunar Irradiance Models in the Frame of the First Multi-Instrument Nocturnal Intercomparison Campaign”. en. In: *Atmospheric Environment* 202, pp. 190–211. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.01.006.
- Baugh, Kimberly et al. (June 2013). “Nighttime Lights Compositing Using the VIIRS Day-Night Band: Preliminary Results”. en. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network* 35.0, pp. 70–86–86. ISSN: 2227-3026. DOI: 10.7125/APAN.35.8.
- Beer, A (1852). “Bestimmung Der Absorption Des Rothen Lichts in Farbigen Flüssigkeiten”. en. In: *Annalen der Physik* 162.5, pp. 78–88. ISSN: 1521-3889. DOI: 10.1002/andp.18521620505.

- Bennie, J et al. (Jan. 2014). “Contrasting Trends in Light Pollution across Europe Based on Satellite Observed Night Time Lights”. en. In: *Scientific Reports* 4.1, pp. 1–6. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep03789.
- Biggs et al. (Apr. 2012). “Measuring and Mapping the Night Sky Brightness of Perth, Western Australia”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 421.2, pp. 1450–1464. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.20416.x.
- Chen, Oliver, and Wood (1987). “Stellar Photometry at the South Pole Optical Telescope”. In:
- Chin, Mian et al. (Nov. 2007). “Intercontinental Transport of Pollution and Dust Aerosols: Implications for Regional Air Quality”. English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 7.21, pp. 5501–5517. ISSN: 1680-7316. DOI: 10.5194/acp-7-5501-2007.
- Chudnovsky, A. et al. (Mar. 2014). “High Resolution Aerosol Data from MODIS Satellite for Urban Air Quality Studies”. en. In: *Open Geosciences* 6.1, pp. 17–26. DOI: 10.2478/s13533-012-0145-4.
- Cinzano (2005). “Night Sky Photometry with Sky Quality Meter”. en. In: DOI: [https://www.researchgate.net/publication/228399779\\_Night\\_Sky\\_Photometry\\_with\\_Sky\\_Quality\\_Meter](https://www.researchgate.net/publication/228399779_Night_Sky_Photometry_with_Sky_Quality_Meter).
- (2007). *Report on Sky Quality Meter, Version L. Tech.Rep. ISTIL*.
- (Dec. 2012). “The Propagation of Light Pollution in the Atmosphere”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 427.4, pp. 3337–3357. ISSN: 0035-8711, 1365-2966. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21884.x.
- Cinzano et al. (Dec. 2001). “The First World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 328.3, pp. 689–707. ISSN: 00358711, 13652966. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04882.x.
- Coughlin, Michael, Christopher Stubbs, and Chuck Claver (June 2016). “A Daytime Measurement of the Lunar Contribution to the Night Sky Brightness in LSST’s Ugrizy Bands—Initial Results”. In: *Experimental Astronomy* 41.3, pp. 393–408. ISSN: 0922-6435, 1572-9508. DOI: 10.1007/s10686-016-9494-1. arXiv: 1510.07574.
- Cuevas, E et al. (Aug. 2019). “Aerosol Optical Depth Comparison between GAW-PFR and AERONET-Cimel Radiometers from Long-Term (2005–2015) 1&thinsp;Min Synchronous

- Measurements”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 12.8, pp. 4309–4337. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-12-4309-2019.
- Davies, Thomas W. et al. (Apr. 2013). “Artificial Light Alters Natural Regimes of Night-Time Sky Brightness”. In: *Scientific Reports* 3. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep01722.
- den Outer, Peter et al. (Apr. 2015). “Stability of the Nine Sky Quality Meters in the Dutch Night Sky Brightness Monitoring Network”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15.4, pp. 9466–9480. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s150409466.
- De et al. (June 2011). “Effects of meteorological and atmospheric parameters on night sky brightness”. nl. In:
- Dubovik, Oleg and Michael D. King (2000). “A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements”. en. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 105.D16, pp. 20673–20696. ISSN: 2156-2202. DOI: 10.1029/2000JD900282.
- Duriscoe, Dan M. (2013). “Measuring Anthropogenic Sky Glow Using a Natural Sky Brightness Model”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 125.933, pp. 1370–1382. ISSN: 0004-6280. DOI: 10.1086/673888.
- Elvidge, Christopher D. et al. (Nov. 2017). “VIIRS Night-Time Lights”. In: *International Journal of Remote Sensing* 38.21, pp. 5860–5879. ISSN: 0143-1161. DOI: 10.1080/01431161.2017.1342050.
- Elvidge et al. (June 2013). “Why VIIRS Data Are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights”. en. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network* 35.0, pp. 62-69–69. ISSN: 2227-3026. DOI: 10.7125/APAN.35.7.
- Falchi et al. (June 2016). “The New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness”. en. In: *Science Advances* 2.6, e1600377. ISSN: 2375-2548. DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- Fernald, Frederick G. (Mar. 1984). “Analysis of Atmospheric Lidar Observations: Some Comments”. EN. In: *Applied Optics* 23.5, pp. 652–653. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/AO.23.000652.
- Fiorentin et al. (Nov. 2019). “Calibration of an Autonomous Instrument for Monitoring Light Pollution from Drones”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.23. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19235091.

- Gil, D et al. (Mar. 2015). “Birds Living near Airports Advance Their Dawn Chorus and Reduce Overlap with Aircraft Noise”. en. In: *Behavioral Ecology* 26.2, pp. 435–443. ISSN: 1045-2249. DOI: 10.1093/beheco/aru207.
- Giles et al. (Jan. 2019). “Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 Database – Automated near-Real-Time Quality Control Algorithm with Improved Cloud Screening for Sun Photometer Aerosol Optical Depth (AOD) Measurements”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 12.1, pp. 169–209. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-12-169-2019.
- Haenel (2015). *Quantifying Sky Quality*.
- Hänel, Andreas et al. (Jan. 2018). “Measuring Night Sky Brightness: Methods and Challenges”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 205, pp. 278–290. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.09.008.
- Harrison, Lee (Aug. 1994). “Objective Algorithms for the Retrieval of Optical Depths from Ground-Based Measurements”. EN. In: *Applied Optics* 33.22, pp. 5126–5132. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/AO.33.005126.
- Holben et al. (Oct. 1998). “AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization”. en. In: *Remote Sensing of Environment* 66.1, pp. 1–16. ISSN: 0034-4257. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
- Hölker et al. (2010). “Light Pollution as a Biodiversity Threat.” English. In: *Trends in Ecology & Evolution* 25.12, pp. 681–682. ISSN: 0169-5347.
- Irwin, Aisling (Jan. 2018). “The Dark Side of Light: How Artificial Lighting Is Harming the Natural World”. en. In: *Nature* 553.7688, pp. 268–270. DOI: 10.1038/d41586-018-00665-7.
- Ivanescu, Liviu (2020). “Accuracy in Starphotometry”. eng. In: DOI: <http://hdl.handle.net/11143/17065>.
- Ivanescu, Liviu et al. (July 2014). “Challenges in Operating an Arctic Telescope”. In: *Ground-Based and Airborne Telescopes V*. Vol. 9145. International Society for Optics and Photonics, p. 914549. DOI: 10.1117/12.2071000.
- Ivanescu, O’Neill, and Blanchet (Dec. 2017). “Spectrophotometric Catalog for Atmospheric Remote Sensing Through Star-Photometry”. In: *AGU Fall Meeting Abstracts* 23.



- Jechow et al. (Apr. 2019). “Beyond All-Sky: Assessing Ecological Light Pollution Using Multi-Spectral Full-Sphere Fisheye Lens Imaging”. en. In: *Journal of Imaging* 5.4, p. 46. DOI: 10.3390/jimaging5040046.
- Jechow, Andreas et al. (July 2017). “Imaging and Mapping the Impact of Clouds on Skyglow with All-Sky Photometry”. In: *Scientific Reports* 7. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-017-06998-z.
- Kacenelenbogen, M. et al. (Apr. 2011). “An Accuracy Assessment of the CALIOP/CALIPSO Version 2/Version 3 Daytime Aerosol Extinction Product Based on a Detailed Multi-Sensor, Multi-Platform Case Study”. English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 11.8, pp. 3981–4000. ISSN: 1680-7316. DOI: 10.5194/acp-11-3981-2011.
- Kahn, Ralph et al. (Jan. 2009). “Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts”. In: Khomich, Vladislav Yu, Anatoly I. Semenov, and Nicolay N. Shefov (2008). *Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics*. en. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-75832-7. DOI: 10.1007/978-3-540-75833-4.
- Klett, James D. (June 1985). “Lidar Inversion with Variable Backscatter/Extinction Ratios”. EN. In: *Applied Optics* 24.11, pp. 1638–1643. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/AO.24.001638.
- Kocifaj (May 2007). “Light-Pollution Model for Cloudy and Cloudless Night Skies with Ground-Based Light Sources”. EN. In: *Applied Optics* 46.15, pp. 3013–3022. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/AO.46.003013.
- (Jan. 2018). “Towards a Comprehensive City Emission Function (CCEF)”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 205, pp. 253–266. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.10.006.
- Kocifaj et al. (Apr. 2020). “Aerosol Characterization Using Satellite Remote Sensing of Light Pollution Sources at Night”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. DOI: 10.1093/mnrasl/slaa060.
- Kolláth et al. (May 2017). “Night Sky Quality Monitoring in Existing and Planned Dark Sky Parks by Digital Cameras”. In: *arXiv:1705.09594 [astro-ph]*. arXiv: 1705.09594.
- Krisciunas, Kevin and Bradley E. Schaefer (Sept. 1991). “A Model of the Brightness of Moonlight”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 103, pp. 1033–1039. ISSN: 0004-6280. DOI: 10.1086/132921.

- Kyba, T. Ruhtz, et al. (Sept. 2012). “Red Is the New Black: How the Colour of Urban Skyglow Varies with Cloud Cover”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 425.1, pp. 701–708. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21559.x.
- Kyba, Kai Pong Tong, et al. (Feb. 2015). “Worldwide Variations in Artificial Skyglow”. en. In: *Scientific Reports* 5.1, p. 8409. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep08409.
- Kyba, Janna M. Wagner, et al. (May 2013). “Citizen Science Provides Valuable Data for Monitoring Global Night Sky Luminance”. en. In: *Scientific Reports* 3.1, p. 1835. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/srep01835.
- Lambert, Johann Heinrich (1760). *I. H. Lambert ... Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*. lat. Augustae Vindelicorum : sumptibus viduae Eberhardi Klett typis Chistophori Petri Detleffsen, 1760.
- Li, Jian et al. (Feb. 2019). “Retrieval of Aerosol Profiles by Raman Lidar with Dynamic Determination of the Lidar Equation Reference Height”. en. In: *Atmospheric Environment* 199, pp. 252–259. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.11.048.
- Li, Carlson, and Lacis (Feb. 2015). “How Well Do Satellite AOD Observations Represent the Spatial and Temporal Variability of PM<sub>2.5</sub> Concentration for the United States?” en. In: *Atmospheric Environment* 102, pp. 260–273. ISSN: 1352-2310. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.12.010.
- Milford, Celia et al. (Jan. 2020). “Impacts of Desert Dust Outbreaks on Air Quality in Urban Areas”. en. In: *Atmosphere* 11.1, p. 23. DOI: 10.3390/atmos11010023.
- Netzel et al. (Dec. 2018). “High-Resolution Map of Light Pollution”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 221, pp. 300–308. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.05.038.
- Noll, S. et al. (July 2012). “An Atmospheric Radiation Model for Cerro Paranal - I. The Optical Spectral Range”. en. In: *Astronomy & Astrophysics* 543, A92. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361/201219040.
- O’Neill, Dubovik, and Eck (May 2001). “Modified Ångström Exponent for the Characterization of Submicrometer Aerosols”. EN. In: *Applied Optics* 40.15, pp. 2368–2375. ISSN: 2155-3165. DOI: 10.1364/AO.40.002368.
- O’Neill, Eck, Smirnov, and Holben (Apr. 2006). “Spectral Deconvolution Algorithm Technical Memo”. en. In: p. 15.

- O'Neill, Eck, Smirnov, Holben, and S. Thulasiraman (2003). "Spectral Discrimination of Coarse and Fine Mode Optical Depth". en. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108.D17. ISSN: 2156-2202. DOI: 10.1029/2002JD002975.
- Ohtake, M. et al. (Sept. 2013). "One Moon, Many Measurements 3: Spectral Reflectance". en. In: *Icarus* 226.1, pp. 364–374. ISSN: 0019-1035. DOI: 10.1016/j.icarus.2013.05.010.
- Pérez-Ramírez (Sept. 2008). "Application of Sun/Star Photometry to Derive the Aerosol Optical Depth". In: *International Journal of Remote Sensing* 29.17-18, pp. 5113–5132. ISSN: 0143-1161. DOI: 10.1080/01431160802036425.
- (Oct. 2012). "Columnar Aerosol Properties from Sun-and-Star Photometry: Statistical Comparisons and Day-to-Night Dynamic". English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.20, pp. 9719–9738. ISSN: 1680-7316. DOI: 10.5194/acp-12-9719-2012.
- Pun and Chu Wing So (Apr. 2012). "Night-Sky Brightness Monitoring in Hong Kong". en. In: *Environmental Monitoring and Assessment* 184.4, pp. 2537–2557. ISSN: 1573-2959. DOI: 10.1007/s10661-011-2136-1.
- Pun, Chu Wing So, et al. (May 2014). "Contributions of Artificial Lighting Sources on Light Pollution in Hong Kong Measured through a Night Sky Brightness Monitoring Network". en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Light Pollution: Theory, Modeling, and Measurements 139, pp. 90–108. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.12.014.
- Puschnig, Thomas Posch, and Stefan Uttenthaler (May 2014). "Night Sky Photometry and Spectroscopy Performed at the Vienna University Observatory". en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. Light Pollution: Theory, Modeling, and Measurements 139, pp. 64–75. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.08.019.
- Ramanathan, V. et al. (Dec. 2001). "Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle". en. In: *Science* 294.5549, pp. 2119–2124. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1064034.
- Rea, M.S. (Dec. 2007). "Making the Move to a Unified System of Photometry". en. In: *Lighting Research & Technology* 39.4, pp. 393–408. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153507077395.
- Ribas, Salvador J. et al. (2017). "Report of the 2016 STARS4ALL/LoNNe Intercomparison Campaign". eng. In: DOI: 10.2312/GFZ.1.4.2017.001.

- Riegel, Kurt W. (Mar. 1973). “Light Pollution: Outdoor Lighting Is a Growing Threat to Astronomy”. en. In: *Science* 179.4080, pp. 1285–1291. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.179.4080.1285.
- Sánchez de Miguel, A. et al. (June 2017). “Sky Quality Meter Measurements in a Colour-Changing World”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 467.3, pp. 2966–2979. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stx145.
- Sánchez, S. F. et al. (Oct. 2007). “The Night Sky at the Calar Alto Observatory”. en. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 119.860, p. 1186. ISSN: 1538-3873. DOI: 10.1086/522378.
- Schmid, J (2000). *The SEVIRI Instrument*.
- Ścieżor, Tomasz (May 2020). “The Impact of Clouds on the Brightness of the Night Sky”. en. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 247, p. 106962. ISSN: 0022-4073. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106962.
- Ścieżor and M. Kubala (Nov. 2014). “Particulate Matter as an Amplifier for Astronomical Light Pollution”. en. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 444.3, pp. 2487–2493. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stu1577.
- Shi, Yingxi R. et al. (Jan. 2019). “Characterizing the 2015 Indonesia Fire Event Using Modified MODIS Aerosol Retrievals”. English. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.1, pp. 259–274. ISSN: 1680-7316. DOI: 10.5194/acp-19-259-2019.
- Simoneau, A. (2018). “Hyperspectral Modelling of the Artificial Night Sky Brightness”. PhD thesis.
- Stoeva, Penka et al. (Jan. 2006). “Influence of the Solar Activity on the Green Atmospheric Airglow Emission”. In: p. 1445.
- TAOS (2006). *TSL237 Sensor Specifications Sheet*.
- van Donkelaar Aaron et al. (June 2010). “Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application”. In: *Environmental Health Perspectives* 118.6, pp. 847–855. DOI: 10.1289/ehp.0901623.
- Walker (1988). “THE EFFECT OF SOLAR ACTIVITY ON THE V AND B BAND SKY BRIGHTNESS”. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 100.626, pp. 496–505. ISSN: 0004-6280.

- Yao, Song et al. (Oct. 2013). “Moon Night Sky Brightness Simulation for Xinglong Station”. In: *Research in Astronomy and Astrophysics* 13.10, pp. 1255–1268. ISSN: 1674-4527. DOI: 10.1088/1674-4527/13/10/013. arXiv: 1304.7107.
- Yin, Z et al. (Oct. 2019). “Aerosol Measurements with a Shipborne Sun–Sky–Lunar Photometer and Collocated Multiwavelength Raman Polarization Lidar over the Atlantic Ocean”. English. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 12.10, pp. 5685–5698. ISSN: 1867-1381. DOI: 10.5194/amt-12-5685-2019.
- Zawadzka, Olga et al. (2018). “Validation of New Satellite Aerosol Optical Depth Retrieval Algorithm Using Raman Lidar Observations at Radiative Transfer Laboratory in Warsaw”. en. In: *EPJ Web of Conferences* 176. Ed. by D. Nicolae et al., p. 04008. ISSN: 2100-014X. DOI: 10.1051/epjconf/201817604008.