

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures et  
postdoctorales

**Monitoring de l'environnement atmosphérique en milieu  
urbain intégrant des images de télédétection : le cas des  
particules fines (PM<sub>2.5</sub>)**

par Karim MEJRI

Faculté des arts et des sciences  
Département de géographie

Mémoire présenté  
en vue de l'obtention du grade de M.Sc. en  
géographie

Janvier 2020

© Karim Mejri, 2020



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures et  
postdoctorales

Ce mémoire s'intitule :

**Monitoring de l'environnement atmosphérique en milieu  
urbain intégrant des images de télédétection : le cas des  
particules fines (PM2.5)**

Présenté par **Karim Mejri**

*A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :*

**James King**  
Président rapporteur

**François Cavayas**  
Directeur de recherche

**Amadou Idrissa Bokoye**  
Examineur externe



## Résumé

Des recherches épidémiologiques à travers le monde ont mis en évidence que l'exposition des populations urbaines aux microparticules fines (PM<sub>2.5</sub>) en suspension dans l'air provenant, entre autres, de la combustion automobile, est à l'origine des nombreux cas des maladies pulmonaires et cardiovasculaires et même des cas de mortalité. Cependant, la plupart de ces études examinent les centres urbains comme des ensembles sans tenir compte que l'exposition des populations aux microparticules n'est pas homogène à travers un espace urbain. À titre d'exemple, les individus demeurant à proximité de grandes artères routières sont beaucoup plus exposés aux microparticules que d'autres demeurant dans des quartiers de faible circulation. Malheureusement, les stations terrestres de mesure des PM<sub>2.5</sub> sont peu nombreuses pour permettre de générer des cartes de concentration des microparticules précises à des échelles fines. Un moyen pour spatialiser l'information sur les concentrations des microparticules est d'introduire l'imagerie de télédétection qui permet de calculer un paramètre optique des aérosols, leur profondeur optique. L'utilisation des images à résolution moyenne à fine n'est pas chose courante dans ce domaine. Ainsi nous avons voulu examiner leur potentiel. Les tests avec des images hyperspectrale et multispectrale à ces résolutions ont montré que la profondeur optique peut être estimée avec suffisamment de précision. Le logiciel AODfinder développé à cette fin se comporte bien. Malheureusement le faible échantillon des valeurs de AOD et des mesures des concentrations des PM<sub>2.5</sub> ne nous a pas permis de se prononcer sur la possibilité d'utiliser le AOD comme proxy des PM<sub>2.5</sub> et ainsi sur la possibilité de raffiner le monitoring des microparticules à l'échelle locale.

**Mots-clés** : hyperspectrale, multispectrale résolution moyenne, fine, pollution atmosphérique, profondeur optique des aérosols (AOD), code atmosphérique, cibles obscures, PM<sub>2.5</sub>.



## Abstract

Epidemiological research around the world has shown that exposure of urban populations to fine microparticles (PM<sub>2.5</sub>) suspended in air from, among other things, car combustion, is responsible for many cases of lung and cardiovascular disease and even mortality. However, most of these studies examine urban centers as ensembles without considering that population exposure to microparticles is not homogeneous across an urban space. For example, individuals living near major arterial roads are much more exposed to microparticles than others living in low traffic neighborhoods. Unfortunately, ground stations measuring PM<sub>2.5</sub> are few and far between to generate accurate microparticle concentration maps at fine scales. One way to spatialize information on microparticle concentrations is to introduce remotely sensed images that allows to calculate an optical parameter of aerosols, their optical depth. The use of medium-to-fine-resolution images is not common in this area. So, we wanted to look at their potential. Tests with hyperspectral and multispectral images at these resolutions have shown that optical depth can be estimated with enough accuracy. The AODfinder software developed for this purpose performs well. Unfortunately, the small sample of AOD values and PM<sub>2.5</sub> concentration measurements did not allow us to conclude on the possibility of using AOD as a proxy for PM<sub>2.5</sub> and thus on the possibility of refining microparticle monitoring at the local level.

**Keywords:** hyperspectral, multispectral, resolution medium, fine, air pollution, aerosol optical depth (AOD), atmospheric code, dark target, PM<sub>2.5</sub>.





## Remerciement

*La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.*

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon directeur de recherche, François Cavayas, pour sa patience, son soutien, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Je désire aussi remercier les professionnels de la Ville de Montréal, spécialement messieurs Richard Mongeau et Simon Gignac, qui m'ont fourni des données et du matériel nécessaire à la réalisation de mon projet ainsi qu'un stage au sein de leur équipe.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma famille et les amis qui m'ont apporté leur support moral tout au long de ma démarche.*



# Table des matières

Résumé .....	5
Abstract.....	7
Remerciement .....	9
Table des matières .....	11
Liste des figures.....	14
Liste des tableaux .....	17
Liste des abréviations: .....	18
1 Introduction .....	21
1.1 Cartographie des concentrations des PM <sub>2.5</sub> : problématique.....	22
1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche.....	24
1.3 Structure du mémoire .....	24
2 Les aérosols : bref aperçu .....	27
2.1 Définitions .....	27
2.2 Typologie des aérosols .....	29
2.2.1 Origine.....	29
2.2.2 Taille.....	30
2.2.3 Forme.....	32
2.2.4 Composition .....	32
2.2.5 Distribution verticale .....	34
2.3 Propriétés optiques des aérosols .....	36
2.3.1 Coefficient d'extinction.....	36
2.3.2 Profondeur optique .....	37
2.4.3 Albédo de diffusion simple.....	37
2.4.4 Coefficient d'Angstrom.....	37
2.4.5 Fonction de phase de diffusion.....	37

3	Cartographie des PM <sub>2.5</sub> par imagerie de télédétection de résolution moyenne à haute : revue de littérature.....	39
3.1	Méthodes d'estimation de l'AOD.....	39
3.1.1	La méthode des cibles obscures.....	41
3.1.2	La méthode de « Deep Blue » .....	43
3.1.3	La méthode des ombres .....	43
3.2	Relations entre AOD et PM <sub>2.5</sub> .....	44
3.2.1	Imagerie de résolution grossière.....	44
3.2.2	Imagerie de résolution moyenne à haute .....	49
3.3	Connaissances sur la région de Montréal .....	51
3.3.1	Profondeur optique .....	51
3.3.2	Relation AOD et PM <sub>2.5</sub> .....	54
4	Méthodes, données et prétraitements.....	57
4.1	Sites à l'étude.....	58
4.2	Images de télédétection .....	58
4.2.1	Données pour la validation du logiciel .....	59
4.2.2	Données pour l'application du logiciel.....	63
4.3	Données du réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal (RSQA) .....	69
4.4	Le logiciel AODFinder .....	72
4.4.1	Formulation et hypothèses de base .....	72
4.4.2	Structure informatique.....	75
5	Application et résultats .....	85
5.1	Validation .....	85
5.1.1	Estimation de l'AOD 550 par les mesure CIMEL .....	85
5.1.2	Estimations CASI .....	87
5.1.3	Estimations LANDSAT-7 .....	89
5.2	Application .....	91

5.2.1 Images CASI.....	91
5.1.1 Image LANDSAT-8 .....	96
5.2 Analyse de la relation AOD- PM <sub>2.5</sub> .....	74
6 Discussion et conclusions.....	79
Références.....	83
Annexe A : caractéristique des images CASI-2016 et données du vol .....	87

## Liste des figures

FIGURE 1-1 CROISSANCE ATTENDUE DE LA POPULATION URBAINE À L'ÉCHELLE MONDIALE JUSQU'À L'ANNÉE 2050 (NATIONS UNIES 2011) .....	21
FIGURE 2-1 TERMINOLOGIE UTILISÉE POUR DES MATIÈRES PARTICULAIRES (SOURCE BROOK ET AL. CIRCULATION 2004 ; 109 :26552671, AMERICAN HEART ASSOCIATION) .....	27
FIGURE 2-2 ORGANES RESPIRATOIRES EXPOSÉS AUX PARTICULES FINES.....	28
FIGURE 2-3 RELATION ENTRE LE POURCENTAGE D'AUGMENTATION DU NOMBRE DES MORTS ET LES NIVEAUX DES CONCENTRATIONS DE $PM_{2.5}$ DANS SIX VILLES AUX ÉTATS-UNIS : RÉGRESSION LINÉAIRE ET INTERVALLE DE CONFIANCE À 95% PAR POINT ESTIMÉ : .....	28
FIGURE 2-4 UN INSTANTANÉ DE LA DISTRIBUTION PLANÉTAIRE DES AÉROSOLS (MODÉLISATION NASA) : EN ORANGÉ POUSSIÈRES DÉSERTIQUES, EN BLEU EMBRUN MARIN, EN VERT FUMÉE ORGANIQUE ET CARBONE NOIR, EN BLANC SULFATE ET SMOG RÉGION INDUSTRIALISÉE (HTTPS://SVS.GSFC.NASA.GOV/11723).....	31
FIGURE 2-5 DISTRIBUTIONS TYPQUES EN NOMBRE, SURFACE ET VOLUME (A) AÉROSOLS URBAINS ET (B) AÉROSOLS CONTINENTAUX (SOURCE : SEINFELD ET PANDIS, 2006).....	33
FIGURE 2-6 MASSES RELATIVES DES COMPOSANTES TYPQUES DES AÉROSOLS (A) AÉROSOL DE FOND NATUREL, (B) AÉROSOL D'UNE ZONE PÉRIURBAINE, (C) AÉROSOL EN PROXIMITÉ D'UNE RUE URBAINE (ADAPTÉ D'ANONYME (2011), INTRODUCTION AUX AÉROSOLS ATMOSPHÉRIQUES HTTPS://WWW.LMD.POLYTECHNIQUE.FR/~STURQUET/TEACHING_DATA/SEANCE2_AEROSOLS.PDF).....	33
FIGURE 2-7 STRUCTURE DE L'ATMOSPHÈRE EN FONCTION DU PROFIL DES TEMPÉRATURES DE L'AIR. ....	35
FIGURE 2-8 DISTRIBUTION DES AÉROSOLS DANS LA TROPOSPHÈRE.....	36
FIGURE 2-9 UN PHOTON DIFFUSÉ PAR UNE PARTICULE EST CARACTÉRISÉ PAR L'ANGLE $\Theta$ DÉFINI ENTRE LA DIRECTION QU'AURAIT LE PHOTON SANS DIFFUSION ET SA DIRECTION AVEC DIFFUSION (SEINFELD & PANDIS, 2006). ....	38
FIGURE 3-1 ANNÉES D'OPÉRATION DES SYSTÈMES SATELLITAIRES FOURNISSANT DES INFORMATIONS SUR LES AÉROSOLS STRATOSPHERIQUE (OCCULTATION) ET TROPOSPHERIQUE (CAPTEURS VISANT AU NADIR) (SOURCE : REMER ET AL., 2013).....	40
FIGURE 3-2 EXEMPLE D'UNE CARTE D'AOD 550 NM OBTENUE PAR L'ANALYSE DES IMAGES À RÉOLUTION KILOMÉTRIQUE DU CAPTEUR MODIS (GUPTA ET AL., 2016).....	41
FIGURE 3-3 A GAUCHE IMAGE EN COULEUR NORMALE DE MODIS TERRA, AU CENTRE LE MÊME TERRITOIRE LA BANDE ROUGE À 650NM ET À DROITE LA BANDE DU BLEU PROFOND 412NM. LES CARACTÉRISTIQUES DE L'AÉROSOL SONT NETTEMENT PLUS	

VISIBLES DANS LE BLEU PROFOND QUE DANS LE ROUGE (HTTPS://DEEPBLUE.GSFC.NASA.GOV/SCIENCE).....	43
FIGURE 3-4 FORCE DE LA RELATION ENTRE $PM_{2.5}$ (MESURÉES IN SITU) ET L’AOD- MODIS (SOURCE : ENGEL-COX ET AL., 2004).....	47
FIGURE 3-5 COEFFICIENTS DE CORRÉLATION ENTRE LES $PM_{2.5}$ ESTIMÉS PAR L’AOD DE MODIS ET LES $PM_{2.5}$ MESURÉES À DES STATIONS TERRESTRES : À GAUCHE $PM_{2.5}$ ESTIMÉS PAR RÉGRESSION LINÉAIRE SIMPLE ET À DROITE $PM_{2.5}$ ESTIMÉS PAR MODÈLE DE RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE INTÉGRANT DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES (SOURCE : GUPTA P., FOLLETTE-COOK, M., DUNCAN B. (2018).....	48
FIGURE 3-6 RELATION ENTRE LES $PM_{10}$ ESTIMÉE PAR DES DONNÉES TM-LANDSAT ET LES $PM_{10}$ MESURÉES IN SITU (SOURCE SALEH ET AL., 2007). ....	50
FIGURE 3-7 EXEMPLES DES MESURES DE L’AOD SPECTRAL (VOIR TEXTE) DE LA CAMPAGNE DE MESURES À MONTRÉAL D’ENVIRONNEMENT CANADA EN 2012 (DONNÉES INÉDITES). ....	53
FIGURE 3-8 STATISTIQUES MENSUELLES PLURIANNUELLES SUR LES AOD MESURÉES À DES STATIONS AEROCAN SITUÉES DANS LA PARTIE SUD-EST DU CANADA (SOURCE : (E.SIORIS, ABOUD, E.FIOLETOV, & A.McLINDEN, 2017) .....	53
FIGURE 3-9 RELATIONS ENTRE AOD SPECTRALE ET $PM_{2.5}$ ÉTABLIES AVEC LES DONNÉES MESURÉES EN ÉTÉ 2012 À MONTRÉAL (VOIR TEXTE ; SOURCE : BOKOYE A., COMMUNICATION PERSONNELLE). ....	54
FIGURE 4-1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE. ....	57
FIGURE 4-2 CHALET DE MONT-ROYAL MONTRANT LA BRUME AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL (SOURCE : RÉSEAU DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L’AIR DE MONTRÉAL, WWW.RSQUA.QC.CA).....	58
FIGURE 4-3 INSTALLATION DU PHOTOMÈTRE SOLAIRE CIMEL L’ÉTÉ 2012. ....	59
FIGURE 4-4 IMAGE LANDSAT-7 EN COULEUR NORMALES (A), POLYGONES DES CIBLES OBSCURES NUMÉROTÉS (B), MODÈLE NUMÉRIQUE D’ALTITUDE DE LA ZONE COUVERTE PAR L’IMAGE. ....	60
FIGURE 4-5 LIGNES DE VOL DE LA MISSION 2012. ....	61
FIGURE 4-6 IMAGES EXTRAITES DE LA LIGNE DE VOL 7 (VRAI COULEUR) ET IMAGES DE L’ANGLE DE VISÉE DU CAPTEUR PAR PIXEL. ....	63
FIGURE 4-7 IMAGE LANDSAT-8 EN VRAI COULEUR .....	64
FIGURE 4-8 AÉRONEF PIPER AZTEC (C-GNZQ) AVEC LE CAPTEUR CASI-1500.....	65
FIGURE 4-9 LIGNE DES VOLS, CHAQUE COULEUR REPRÉSENTE UNE DATE DIFFÉRENTE DU SURVOL AU-DESSUS DE L’ILE DE MONTRÉAL (SOURCE ITRES2016). ....	66
FIGURE 4-10 TUILE D’IMAGE CASI ORTHORECTIFIÉE EN COULEUR NORMALE (BLEU : CANAL 13 À 453NM, VERT : CANAL 27 À 553NM, ROUGE : CANAL 41 À 652NM) MONTRANT UNE PORTION D’UNE LIGNE DE VOL D’UNE FAUCHÉE D’ENVIRON 1200 MÈTRES. ....	66

FIGURE 4-11 EXEMPLE D'UNE IMAGE CASI ET DES IMAGES QUI L'ACCOMPAGNENT: A) IMAGE CASI (COULEURS NORMALES) ; B) MNS ; C) ANGLE DE VISÉE PAR PIXEL ; D) AZIMUT DE VISÉE PAR PIXEL.....	67
FIGURE 4-12 VÉGÉTATION DENSE (CIBLE OBSCURE) SUR L'ILE DE MONTRÉAL .....	68
FIGURE 4-13 PORTION DES POLYGONES DES CIBLES OBSCURES SUPERPOSÉS SUR UNE TUILE CASI 2016. LES POLYGONES DANS LES ZONES NON COUVERTES PAR L'IMAGE SONT AUTOMATIQUEMENT MASQUÉS PAR LE LOGICIEL AODFINDER (VOIR SECTION 4.4). .....	69
FIGURE 4-14 LOCALISATION DES CIBLES OBSCURES SUR LES IMAGES CASI 2016. ....	69
FIGURE 4-15 STATIONS DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR DE LA VILLE DE MONTRÉAL. ....	71
FIGURE 4-16 PROCÉDURE DU LOGICIEL AODFINDER POUR L'ESTIMATION DE L'AOD À PARTIR DE L'IMAGERIE DE RÉOLUTION SPATIALE MOYENNE À HAUTE. ....	76
FIGURE 5-1 RÉGRESSION POLYNOMIALE DE DEUXIÈME DEGRÉ ENTRE CIMEL AOD ET LONGUEUR D'ONDE.....	86
FIGURE 5-2 RÉGRESSION POLYNOMIALE DE DEUXIÈME DEGRÉ ENTRE CIMEL AOD ET LONGUEUR D'ONDE.....	86
FIGURE 5-3 RÉGRESSION POLYNOMIALE DE DEUXIÈME DEGRÉ ENTRE CIMEL AOD ET LONGUEUR D'ONDE.....	87
FIGURE 5-4 CARTES DES CONCENTRATIONS DE PM <sub>2.5</sub> POUR LES JOURS D'ACQUISITION DES IMAGES CASI 2016. ATTENTION : L'ÉCHELLE DES COULEURS N'EST PAS LÀ MÊME POUR TOUTES LES CARTES. ....	75
FIGURE 5-5 RELATION ENTRE PM <sub>2.5</sub> MESURÉ LORS DU PASSAGE DE L'AVION ET AOD MOYEN ESTIMÉ PAR LES DONNÉES CASI.....	76
FIGURE 6-1 EXEMPLES DES DÉFORMATIONS GÉOMÉTRIQUES DES IMAGES CASI (MISSION 2012). ....	80



## Liste des tableaux

TABLEAU 3-1 MÉTHODES UTILISÉES POUR ÉTABLIR LA RELATION ENTRE L'AOD ET LES PM <sub>2.5</sub> .....	45
TABLEAU 4-1 CARACTÉRISTIQUES DE LA LIGNE DE VOL 7, MISSION 2012 CASI-1500..	63
TABLEAU 4-2 IDENTIFICATION DES TUILES CASI 2016 UTILISÉES POUR L'APPLICATION DU LOGICIEL AODFINDER ET STATIONS RSQA INCLUSES DANS LA TUILE.....	70
TABLEAU 4-3 LISTE DES SYMBOLES .....	74
TABLEAU 4-4 PARAMÈTRES POUR LA CRÉATION DES LUT DANS LE CAS DES IMAGES CASI .....	81
TABLEAU 4-5 PARAMÈTRES POUR LA CRÉATION DES LUT DANS LE CAS DES IMAGES LANDSAT .....	81
TABLEAU 5-1 RÉSULTATS OBTENUS PAR AODFINDER POUR LE 1 <sup>ER</sup> ET 2 <sup>ÈME</sup> PASSAGE DE CASI 2012 : CIBLES OBSCURES DANS LA PARTIE OUEST DES IMAGES .....	88
TABLEAU 5-2 RÉSULTATS OBTENUS PAR AODFINDER POUR LE 1 <sup>ER</sup> ET 2 <sup>ÈME</sup> PASSAGE DE CASI 2012 : CIBLES OBSCURES DANS LA PARTIE EST DES IMAGES .....	89
TABLEAU 5-3 RÉSULTATS DE AODFINDER AVEC L'IMAGE LANDSAT-7 DANS LES BANDES BLEUE ET ROUGE .....	90
TABLEAU 5-4 CALCULS DE L'AOD 550NM À PARTIR DE LA VISIBILITÉ MESURÉE À L'AÉROPORT DE MONTRÉAL .....	91
TABLEAU 5-5 RÉSULTAT AODFINDER POUR LES IMAGES CASI.....	93
TABLEAU 5-6 RÉSULTAT AODFINDER POUR LES IMAGES CASI.....	94
TABLEAU 5-7 RÉSULTAT AODFINDER POUR LES IMAGES CASI.....	95
TABLEAU 5-8 RÉSULTATS AODFINDERSAT POUR LES IMAGES LANDSAT-8 DANS LES BANDES BLEUES CÔTIÈRE, BLEUE ET ROUGE.....	97
TABLEAU 5-9 MOYENNE DES AOD A 550NM POUR CHAQUE STATION RSQA ASSOCIÉS AVEC LES MESURES JOURNALIÈRES DES PM <sub>2.5</sub> .....	76
TABLEAU 5-10 MOYENNE DES AOD A 550NM POUR CHAQUE STATION RSQA ASSOCIÉS AVEC LES MESURES JOURNALIÈRES DES PM <sub>2.5</sub> .....	77

## Liste des abréviations:

6SV: Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum vector version  
AATSR: Advanced Along-Track Scanning Radiometer  
Aerocan: AEROSol CANada  
AERONET: AERosols RObotic NETwork un-photometer  
AND: Acide désoxyribonucléique  
AOD: Aerosols optical depth  
AOT: Aerosols optical thickness  
APS: Aerodynamic Particle Sizer  
AVHRR: Advanced Very High-Resolution Radiometer  
AVIRIS: Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer  
CASI: Compact Airborne Spectrographic Imager  
CNES: Centre national d'étude spatial  
CO: Cible Obscure  
DL: Deep learning  
EARLINET: European Aerosol Research Lidar NETwork  
EOSP: Earth Observing Scannig Polarimeter  
FWHM: Full Width at Half Maximum  
GMT: Greenwich Mean Time  
GOME: global monitoring of atmospheric Ozone  
HALOE: Halogen Occultation Experiment  
IDW : Inverse Distance Weighting  
IQA : Indice de la qualité de l'air  
ISQ : Institut de la statistique du Québec  
LTER-NASA: Long-Term Ecological Research National, Aeronautics and Space Administration  
LUT: Look-up-table  
LWIR: LongWave InfraRed  
MERIS: MEdium-spectral Resolution, Imaging Spectrometer  
MISR: Multiangle Imaging Spectroradiometer  
MNA : Modèle numérique de terrain

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers  
MTM : Mercator Transverse modifiée  
MWIR : MidWave InfraRed  
OMI : Ozone Monitoring Instrument  
OMS : Organisation mondiale de la santé  
PBL: Planetary Boundary Layer  
PM 2.5: Particulate Matter de diamètre 2.5 micromètres  
POAM: Polar Ozone and Aerosol Measurement  
POLDER: POLarization and Directionnaly of the Earth's Reflectance  
POLDER: POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances  
REM : Rayonnement électromagnétique  
RSQA : Réseau de surveillance de la qualité de l'air  
SAGE: Stratospherique Aerosols and Gas Experiment  
SAM: Stratosphérique Aérosols Mesurment  
SCIAMACHY: Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography  
SeaWIF: Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor  
SWIR: ShortWave InfraRed  
TOA: Top of the atmosphere  
TOMS : Total Ozone Monitoring Spectrometer  
VIIRS : Visible Infrared Imaging Radiometer Suite  
VNIR : Visible Near Infrared



# 1 Introduction

Les niveaux de pollution de l'air restent dangereusement élevés dans de nombreuses régions du monde. Des recherches médicales montrent que divers polluants atmosphériques (CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>...), particulièrement les particules d'aérosol en suspension dans l'air de diamètre inférieur à 2.5µm (PM<sub>2.5</sub>), ont des impacts sanitaires incontestables sur les individus souffrants de pathologies chroniques pulmonaires et cardiovasculaires (Pope *et al.*, 2019). De données récentes de l'organisation mondiale de la santé montrent que 9 personnes sur 10 respirent un air contenant des niveaux préoccupants de polluants et l'on estime à 4.2 millions les décès prématurés causés dans le monde par la pollution ambiante (OMS, 2018<sup>1</sup>). Avec les changements climatiques et la concentration sans cesse croissante de la population dans les milieux urbains (figure 1.1), il est normal que plusieurs questions portant sur l'environnement urbain (îlots de chaleur, pollution de l'air et des eaux, inondations éclair, etc.) préoccupent de plus en plus les administrations municipales et métropolitaines.

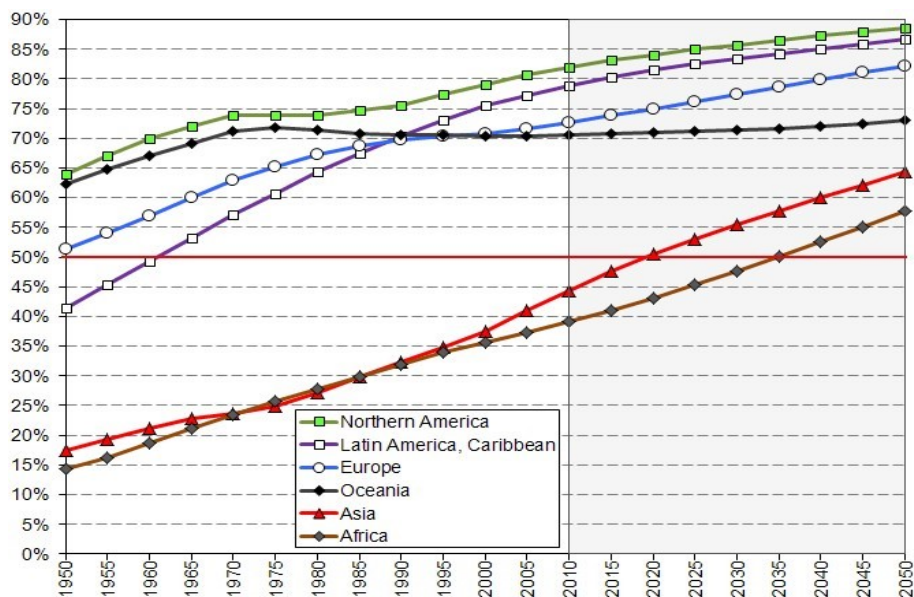


Figure 1-1 Croissance attendue de la population urbaine à l'échelle mondiale jusqu'à l'année 2050 (Nations Unies 2011)

Dans ce contexte, la Ville de Montréal (division de la géomatique) et l'Université de Montréal (département de géographie) en collaboration avec l'Université du Québec à Montréal (département de géographie) et Environnement et Changement Climatique

<sup>1</sup> <https://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathepolluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Canada (Approches intégrées en qualité de l'air) ont mis sur pied un projet de recherche, l'Observatoire Spatial Urbain. Son but est de développer un système géomatique dédié au suivi de l'environnement urbain intégrant les données de télédétection spatiale et aérienne et des données géospatiales. L'accent dans la présente phase de développement est mis sur trois thématiques : la pollution atmosphérique, les îlots de chaleur intraurbains et les propriétés physiques des matériaux de surface. Notre projet de recherche s'inscrit dans le volet pollution atmosphérique et vise plus particulièrement la cartographie des concentrations des microparticules PM<sub>2.5</sub> à l'échelle locale. Cette échelle cartographique est souhaitée dans les études médicales qui essaient d'établir les liens entre l'exposition des individus aux PM<sub>2.5</sub> dans leur lieu de résidence et les taux de morbidité/mortalité cardiovasculaire et pulmonaire.

### **1.1 Cartographie des concentrations des PM<sub>2.5</sub> : problématique**

La source principale de données sur la concentration des PM<sub>2.5</sub> et, en général, des polluants atmosphériques, est un réseau de stations terrestres permanentes disséminées dans le milieu urbain. Plusieurs villes et régions métropolitaines à travers le monde possèdent de tels réseaux. Les données recueillies, la plupart de temps sur une base horaire, constituent la matière première des nombreuses études portant sur les impacts de la pollution atmosphérique à court ou à long terme sur la santé parue depuis les 30 dernières années dans la littérature médicale et épidémiologique (Zanobetti et Schwartz 2007; von Klot *et al.*, 2009; Berglind *et al.* 2009). De données socioéconomiques et parfois des données météorologiques sont introduites dans les analyses afin de tenir compte que des facteurs autres que la pollution de l'air a un impact sur la santé. La principale lacune de ces études est que le degré d'exposition aux polluants des individus composant la cohorte étudiée pris isolément est ignoré. À titre d'exemple un individu demeurant proche d'une grande artère routière n'aura pas le même degré d'exposition aux microparticules issues de la combustion automobile qu'un autre demeurant dans un quartier avec peu de circulation automobile. D'autre part la concentration des aérosols au-dessus d'un lieu quelconque est très dépendante des conditions météorologiques tout particulièrement des vents. La circulation des vents à l'intérieur des villes, la présence des îlots de chaleur, la stabilité ou non de l'atmosphère sont des facteurs qui font que le degré d'exposition varie continuellement dans l'espace et dans le temps. L'estimation

du degré d'exposition des individus tenant compte de tous ces facteurs constitue actuellement la question fondamentale de recherche dans le domaine qui nous préoccupe (Hoek *et al.*, 2003; Jerrett *et al.* 2005; Zhang *et al.* 2018).

La méthode la plus souvent utilisée pour tenir compte du degré d'exposition localement dans un milieu urbain est celle de l'interpolation spatiale des valeurs de concentration des polluants mesurées aux stations (Tonne *et al.*, 2007; von Klot *et al.*, 2009; Pearce *et al.*, 2009; Zhang *et al.* 2018). Différentes données cartographiques (p. ex. types d'occupation du sol, densité du réseau routier) ou des mesures issues des données cartographiques (p. ex., distance par rapport aux axes routiers, topographie, etc.) ainsi que des données météorologiques (vents, températures, etc.) et des données socioéconomiques sont introduites dans ces analyses pour mieux décrire le degré d'exposition et, comme précédemment, afin de tenir compte que des facteurs autres que la pollution de l'air ont un impact sur la santé. Jerrett *et al.* (2005) et Zhang *et al.* (2018) présentent une revue de différentes méthodes utilisées. Bien que ces études tiennent compte d'une certaine manière de l'hétérogénéité de l'espace urbain, des incertitudes parfois importantes au niveau local demeurent car les résultats des interpolations dépendent toujours du nombre de stations de mesure, de leur distribution spatiale ainsi que de l'environnement où ces stations sont placées.

Une autre façon de mieux spatialiser l'information sur la concentration des polluants est d'utiliser les données de télédétection, particulièrement celles provenant des satellites (Tulloch et Li, 2004 ; Hoff et Christopher, 2009 ; Kloog *et al.* 2011 ; Chu *et al.* 2016). Le postulat de base est que la profondeur optique des aérosols (désormais en abrégé AOD), pouvant être déduite des données de télédétection dans la partie optique du spectre, peut être considérée comme un proxy de la concentration des microparticules dans les basses couches atmosphériques telle que mesurée à des stations terrestres de qualité de l'air. En établissant la relation entre AOD et  $PM_{2.5}$  il est donc possible de raffiner la cartographie obtenue par interpolation spatiale des mesures des stations terrestres. Le potentiel et les limitations de cette approche ont été abondamment étudiés pour la cartographie des  $PM_{2.5}$  à l'échelle régionale et continentale à partir de l'imagerie à résolution kilométrique (van Donkelaar *et al.*, 2006; Martin 2008; Lenoble *et al.* 2013) mais pas pour la cartographie à l'échelle locale, du moins à notre connaissance. C'est la question principale de notre recherche : est-ce possible, en

profitant des nombreux types d'imagerie (optique satellitale) à des résolutions plus fines que la centaine de mètres, on peut obtenir une cartographie à l'échelle locale sur une base journalière ou presque comme avec l'imagerie à résolution faible?

## **1.2 Objectifs et hypothèses de la recherche**

L'objectif principal de notre projet de recherche est d'évaluer le potentiel de l'imagerie de télédétection multispectrale et hyperspectrale de résolution spatiale moyenne à haute de nous fournir des informations sur les concentrations des microparticules (PM<sub>2.5</sub>) à l'échelle locale dans la région métropolitaine de Montréal.

Les objectifs spécifiques de notre projet sont les suivants :

- Développer et valider une méthode d'estimation de l'AOD à partir des données des télédétections de résolution moyenne à fine ;
- Évaluer la relation entre l'AOD et la concentration des PM<sub>2.5</sub> mesurées aux stations de qualité de l'air de l'île de Montréal.

La principale hypothèse est qu'il existe une relation significative entre les AOD et les PM<sub>2.5</sub>. Cette hypothèse est réconfortée par l'étude récente de Sioris *et al.* (2017) qui ont étudié les relations entre l'AOD mesuré aux stations terrestres du réseau AEROCAN et les PM<sub>2.5</sub> mesurés aux stations terrestres de mesure de la qualité de l'air pour une longue période de temps. Ils concluent qu'une corrélation forte existe entre AOD et PM<sub>2.5</sub> (moyennes horaires) dans les régions les plus polluées au Canada comme les grandes agglomérations urbaines.

## **1.3 Structure du mémoire**

Notre mémoire est divisé en cinq chapitres excluant ce chapitre d'introduction. Le chapitre 2 et 3 présentent une revue de littérature sur les aérosols et les PM<sub>2.5</sub> et les possibilités d'estimer leur concentration via les données de télédétection. Le chapitre 4 décrit notre méthodologie de recherche, les données utilisées et leurs prétraitements ainsi que le logiciel développé pour l'estimation de l'AOD. Le chapitre 5 présente les résultats des analyses des images de télédétection. Enfin, le chapitre 6 présente une



discussion générale sur les résultats obtenus, nos principales conclusions et les possibilités des recherches futures.



## 2 Les aérosols : bref aperçu

Les aérosols et leurs impacts sur le climat et l'environnement de la Terre (forçage radiatif, formation des nuages) constituent un sujet d'étude de pointe dans les sciences atmosphériques. Plusieurs ouvrages parus les dernières années présentent en détail les caractéristiques physicochimiques des aérosols, leurs sources et leur distribution spatiotemporelle. Le lecteur intéressé est invité à consulter les ouvrages de Boucher *et al.* (2013), Lenoble *et al.* (2013) et Seinfeld et Pandis (2006). Ce chapitre ne présente que quelques notions de base sur les aérosols qui serviront comme référence aux chapitres subséquents.

### 2.1 Définitions

Les termes « matière particulaire », « particules d'aérosol atmosphérique » ou simplement « aérosols atmosphériques », tels qu'utilisés dans les sciences atmosphériques, désignent toute particule (organique ou inorganique) solide ou liquide (à l'exception de l'eau) en suspension dans l'air de taille plus grande que quelques molécules et plus petite que les gouttes des nuages. Ces particules ont ainsi des tailles qui varient entre 0.001 et 100  $\mu\text{m}$ . Dans les études liées à la pollution atmosphérique et/ou la santé nous parlons de la matière particulaire totale ou  $\text{PM}_T$  (diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$ ), la matière particulaire de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  ou  $\text{PM}_{10}$ , de la matière particulaire de diamètre inférieur à 2.5  $\mu\text{m}$  ou  $\text{PM}_{2.5}$  et de la matière particulaire de diamètre inférieur à 0.1  $\mu\text{m}$  ou  $\text{PM}_{0.1}$  (figure 2.1).

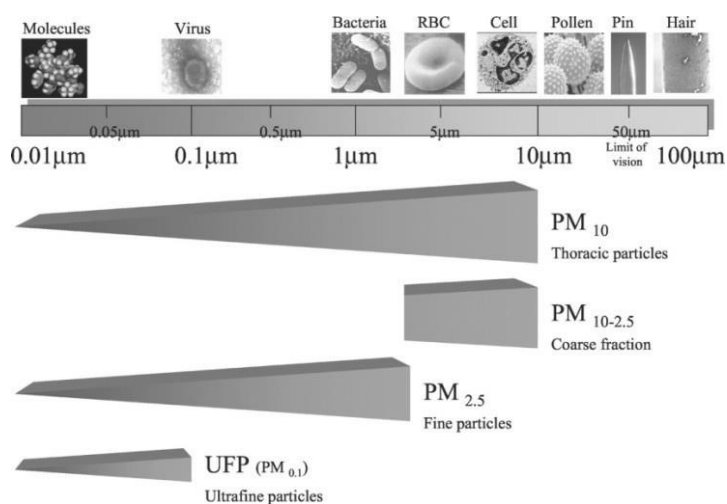


Figure 2-1 Terminologie utilisée pour des matières particulaires (source Brook *et al.* *Circulation* 2004 ; 109 :26552671, American Heart Association)

Pour les études portant sur l'impact des aérosols à la santé humaine, la concentration dans l'air des  $\text{PM}_{10}$  dites particules thoraciques est d'intérêt parce qu'elles peuvent

pénétrer dans le système respiratoire (figure 2.2). La fraction fine ( $PM_{2.5}$ ) est celle qui atteint les alvéoles pulmonaires où se font les échanges gazeux. Ces particules sont considérées les plus dommageables particulièrement pour les maladies cardiovasculaires (Lepeule *et al.*, 2012). La figure 2.3 donne un exemple de la relation entre taux de mortalité et concentrations  $PM_{2.5}$  établie selon les statistiques recueillies dans six villes aux États-Unis.

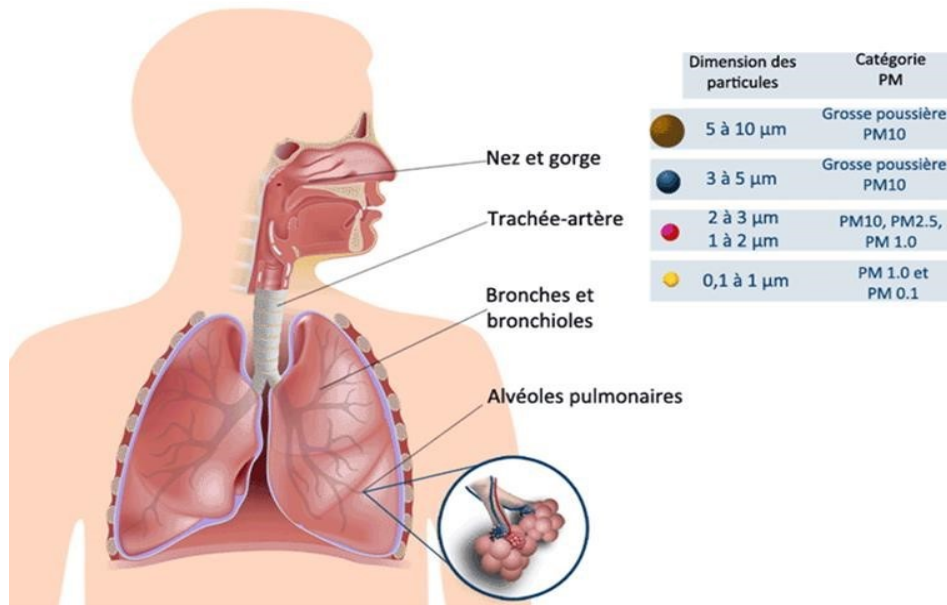


Figure 2-2 Organes respiratoires exposés aux particules fines.

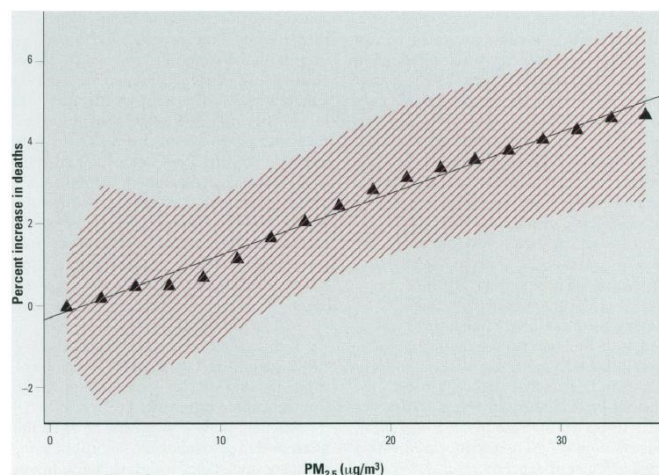


Figure 2-3 Relation entre le pourcentage d'augmentation du nombre des morts et les niveaux des concentrations de  $PM_{2.5}$  dans six villes aux États-Unis : régression linéaire et intervalle de confiance à 95% par point estimé : surface hachurée (source : Schwartz *et al.* (2002). The Concentration-Response Relation between  $PM_{2.5}$  and Daily Deaths, *Environmental Health Perspectives*, 110 (10): 1025-1029; Figure 1).

## 2.2 Typologie des aérosols

Les aérosols que l'on retrouve dans l'air à un moment précis au-dessus d'un milieu quelconque sont un mélange de nombreux composants locaux ou régionaux. Ils peuvent être caractérisés par leurs origines, leurs tailles et formes, leur composition et leurs propriétés physicochimiques. Toutes les particules en suspension peuvent rester dans l'air pendant une très courte durée avant leur déposition au sol. En général, une particule fine plus légère sera suspendue dans l'atmosphère pendant des semaines, ce qui les classe comme nuisance pour la santé humaine. Les plus grosses particules ont tendance à se déposer rapidement au sol par la force de la gravité terrestre.

### 2.2.1 Origine

Les aérosols peuvent provenir des sources naturelles ou anthropiques locales ou peuvent être émis à des lieux plus ou moins lointains et transportés par les vents et les nuages. Les poussières désertiques, les feux de forêt, les embruns marins sont des exemples des sources naturelles d'aérosols. Les cendres industrielles, la combustion du fuel fossile sont des exemples des sources anthropiques. La figure 2.4 est une illustration de la distribution planétaire des différents types d'aérosols d'origine naturelle ou anthropique. Que ce soit de source naturelle ou anthropique, les particules peuvent être directement émises dans l'atmosphère (aérosols primaires), par exemple les particules de poussière, ou être formées dans l'atmosphère par des gaz précurseurs, comme le  $\text{SO}_2$  ou le  $\text{NO}_2$ , à la suite de réactions chimiques complexes (aérosols secondaires).

Après la révolution industrielle les concentrations en polluants atmosphériques en milieu urbain n'ont pas cessées d'augmenter causant une détérioration de la qualité de l'air et l'apparition des nouvelles maladies surtout dans les zones avoisinantes des sorties de cheminées industrielles et des axes routiers. Les raffineries, les stations de production d'énergie fossile, le craquage catalytique, les systèmes de refroidissement, les cimenteries, les incinérateurs de déchets, les cheminées des maisons et surtout les échappements des automobiles sont des exemples de sources de pollutions atmosphérique.

### 2.2.2 Taille

Nous avons déjà mentionné la classification des aérosols selon leur diamètre aérodynamique (figure 2.1). Nous parlons aussi des particules : (a) *grossières* dont le diamètre peut aller de 2.5  $\mu\text{m}$  jusqu'à 100  $\mu\text{m}$  (b) *fines*, d'un diamètre ne dépassant pas les 2.5  $\mu\text{m}$  et c) *ultrafines* lorsque leur diamètre est inférieur à 0.1  $\mu\text{m}$ . Puisque les aérosols présentent une certaine homogénéité en termes de taille selon leur processus d'émission, de formation in situ et des transformations subséquentes on les classifie en différents *modes* selon leur diamètre : (a) mode de nucléation ; (b) mode d'Aitken ; (c) mode d'accumulation ; et (d) mode grossier. Le mode de nucléation comprend le plus souvent des particules d'aérosols fraîchement créées in situ par des gaz précurseurs par le processus dit de nucléation. Leur taille ne dépasse pas les 10 nm environ. Le mode d'Aitken (ou noyaux d'Aitken) comprend des aérosols qui commencent leur « vie atmosphérique » comme des particules primaires et des aérosols secondaires se condensent sur elles pendant leur transport à travers l'atmosphère. Leur taille varie à peu près entre 10 nm et 100 nm. Selon les définitions précédentes, mode de nucléation et mode d'Aitken sont des particules ultrafines. Le mode d'accumulation comprend des particules primaires dont leur taille croît par la condensation sur elles des particules secondaires ou par la coagulation des particules fines. Leur taille varie de 0.1  $\mu\text{m}$  à environ 2  $\mu\text{m}$ . Finalement le mode grossier comprend le plus souvent les particules primaires générées par des processus mécaniques comme le vent et l'érosion (poussières, sels de mer, pollens, etc.).

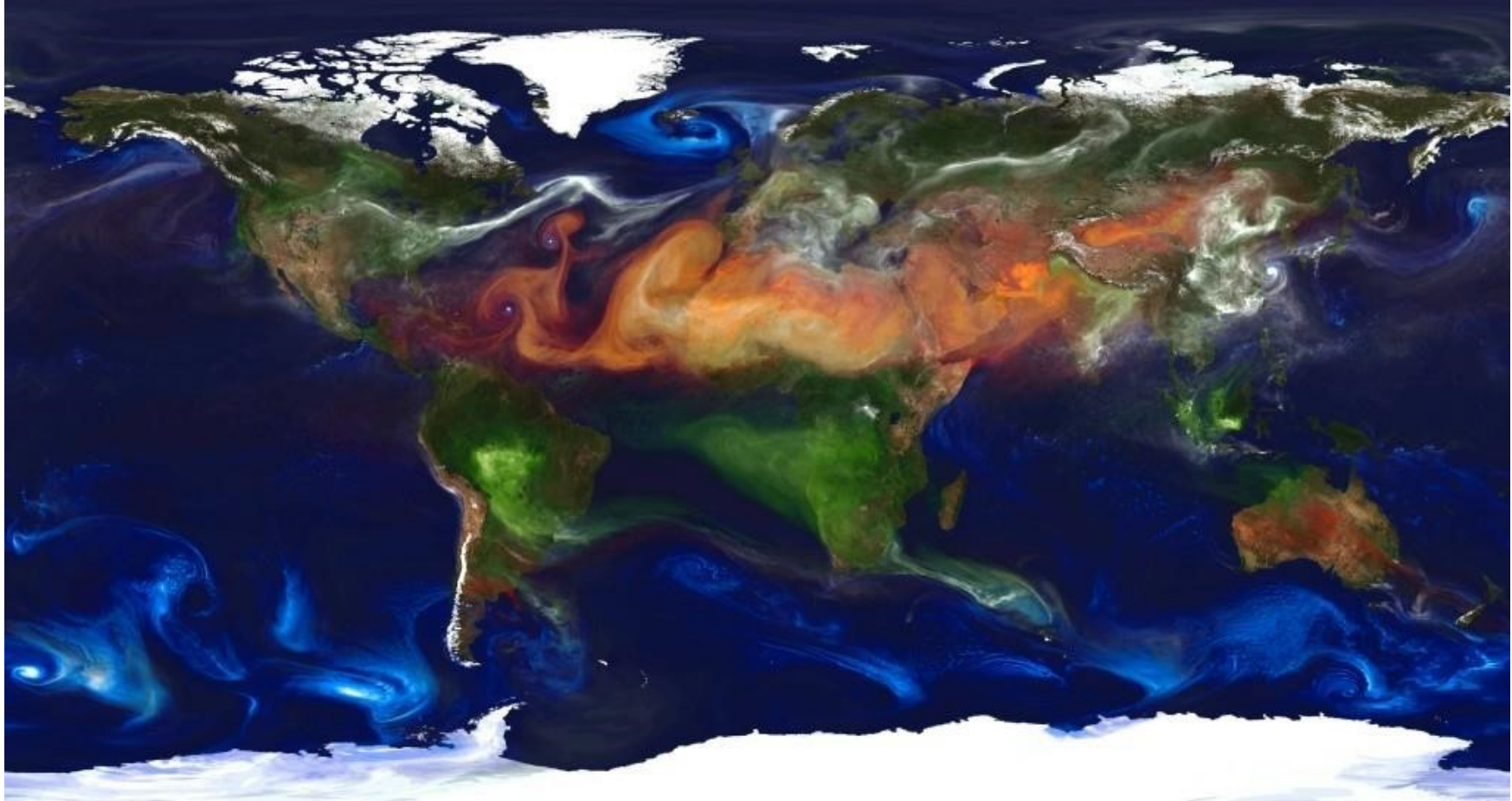


Figure 2-4 Un instantané de la distribution planétaire des aérosols (modélisation NASA) : en orangé poussières désertiques, en bleu embrun marin, en vert fumée organique et carbone noir, en blanc sulfates et smog région industrialisée (<https://svs.gsfc.nasa.gov/11723>).

### 2.2.3 Forme

Les aérosols liquides sont généralement de forme sphérique. En revanche, les aérosols solides prennent une forme caractéristique de leurs composants. Généralement, les aérosols les plus hygroscopiques (hydrophiles, ex. sel de mer) sont d'une forme sphérique tandis que les moins hygroscopiques (hydrophobes, ex. suie ou poussières) sont plutôt non sphériques.

### 2.2.4 Composition

Considérés à une échelle planétaire ou continentale, les aérosols primaires grossiers de source naturelle (poussières désertiques, sels de mer, etc.) dominent largement en termes de volume d'émission. À des échelles plus fines, les sources des aérosols et donc la composition des aérosols varie beaucoup d'un milieu à l'autre. On reconnaît ainsi des aérosols de type urbain, maritime, continental rural, etc. Seinfeld et Pandis (2006) présentent des détails sur ces aérosols. Ici nous n'examinerons que les aérosols urbains d'intérêt dans cette recherche.

La figure 2.5 compare la distribution typique en nombre, surface et volume par unité de volume d'air des aérosols urbains et des aérosols du type continental éloigné. Ce dernier comprend des particules générées naturellement et sert de référence pour étudier les impacts des aérosols anthropogéniques. En milieu urbain, il y a un nombre de particules ( $n_N$ ) de plusieurs ordres de magnitude plus élevé dans les différents intervalles de diamètre et une dominance de particules ultrafines autant en nombre et en surface ( $n_S$ ). Quant au volume ( $n_V$ ), il y a une tendance plus nette à une distribution à deux modes, le mode d'accumulation et le mode grossier. Dans le cas des aérosols continentaux les particules fines proviennent surtout de l'oxydation de l'ammonium et des sulfates tandis que les particules grossières sont composées des poussières et du pollen. Dans les milieux urbains les particules fines sont produites directement par des sources de combustion ou sont formées par des gaz précurseurs tandis que les particules grossières comprennent à part les particules standards comme les poussières et les sels de mer, des particules spécifiques aux milieux urbains comme ceux provenant de l'usure des pneus. La figure 2.6 donne un exemple de la



composition des différents types d'aérosol selon la position géographique dans un milieu urbain en comparaison avec un aérosol de fond.

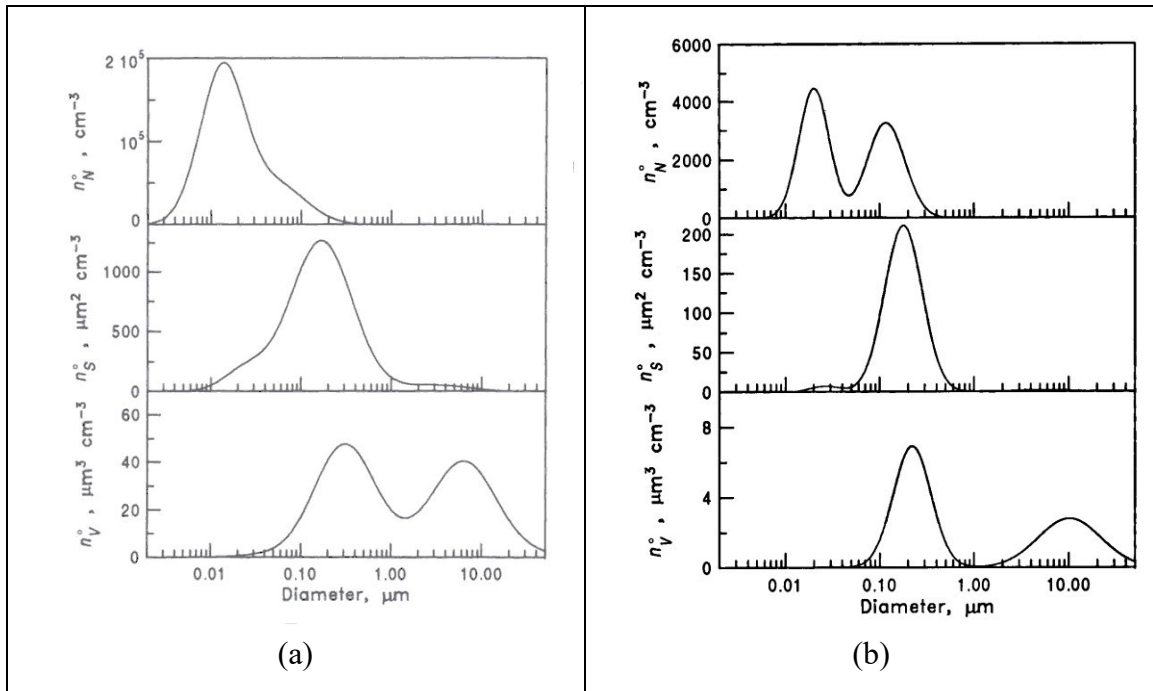


Figure 2-5 Distributions typiques en nombre, surface et volume (a) aérosols urbains et (b) aérosols continentaux (Source : Seinfeld et Pandis, 2006).

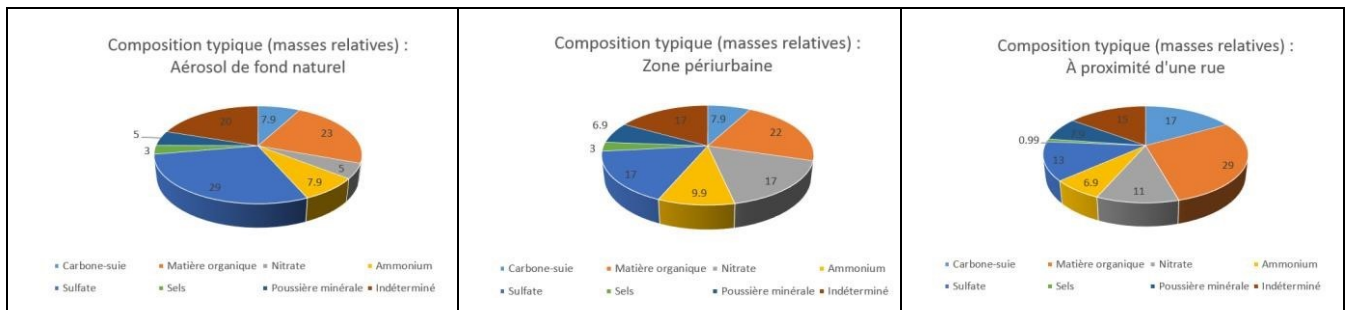


Figure 2-6 Masses relatives des composantes typiques des aérosols (a) aérosol de fond naturel, (b) aérosol d'une zone périurbaine, (c) aérosol en proximité d'une rue urbaine (adapté d'Anonyme (2011), Introduction aux aérosols atmosphériques [https://www.lmd.polytechnique.fr/~sturquet/teaching\\_data/Seance2\\_Aerosols.pdf](https://www.lmd.polytechnique.fr/~sturquet/teaching_data/Seance2_Aerosols.pdf))

Le mode de nucléation dans les milieux urbains contient peu de particules. Cependant, près de sources locales de combustion un nombre important peut-être observé mais ces particules condensent rapidement en des particules fines passant ainsi au mode d'accumulation. De plus, dans la majorité des cas, comme les concentrations en mode d'accumulation sont déjà fortes, les gaz précurseurs se condensent sur ces particules sans passer par la nucléation des

particules « fraîches » d'aérosol. Ces transformations rapides dans un milieu urbain font que l'aérosol urbain présente des caractéristiques fort variables selon l'éloignement des sources émettrices.

### **2.2.5 Distribution verticale**

L'atmosphère est composée verticalement de plusieurs couches selon le profil vertical des températures de l'air : troposphère, stratosphère, mésosphère, et thermosphère. Tropopause, stratopause, mésopause et thermopause sont les termes employés pour signifier la frontière supérieure de chacune de ces couches (figure 2.7).

Bien que les particules d'aérosol (par ex. cendres volcaniques) puissent monter jusqu'à la stratosphère suivant différents mécanismes naturels (aérosols stratosphériques) nous nous limiterons ici aux aérosols qui se trouvent en grande abondance dans la troposphère (aérosols troposphériques). En effet, comme la plupart des aérosols sont de type terrestre, ils sont généralement concentrés dans les couches inférieures de la troposphère. Cependant, les particules peuvent atteindre des niveaux plus élevés (4-6 km) et peuvent être transportés sur de longues distances (Lenoble *et al.*, 2013). Les aérosols troposphériques peuvent avoir un impact important sur la santé, en raison de leur long séjour et à leur propagation partout dans le monde. Les microparticules peuvent migrer des milliers de kilomètres d'un continent à un autre selon les types d'émission que ce soit naturelle ou à cause des activités humaines (figure 2.4).

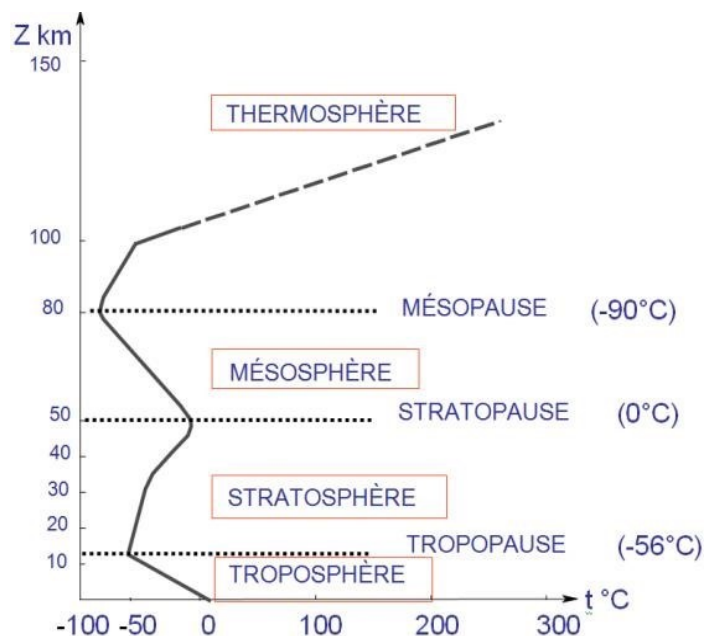


Figure 2-7 Structure de l'atmosphère en fonction du profil des températures de l'air.

La troposphère se divise en deux sous-couches (figure 2.8) : la première est la couche limite atmosphérique, s'étendant de la surface terrestre à environ 1 km, et la deuxième est la troposphère libre, s'étendant de 1 km environ à la tropopause (figure 2.7). La couche limite ou peplosphère (an abrégé PBL de l'anglais *Planetary Boundary Layer*) est la plus fortement influencée par l'air qui s'est trouvé en contact avec la surface terrestre et où sont émis, se dispersent, réagissent et sont transportés les aérosols et les autres contaminants atmosphériques (Bisson, 1986). Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, la PBL joue un rôle important dans la définition de la relation entre la profondeur optique des aérosols et la concentration des  $PM_{2.5}$ .

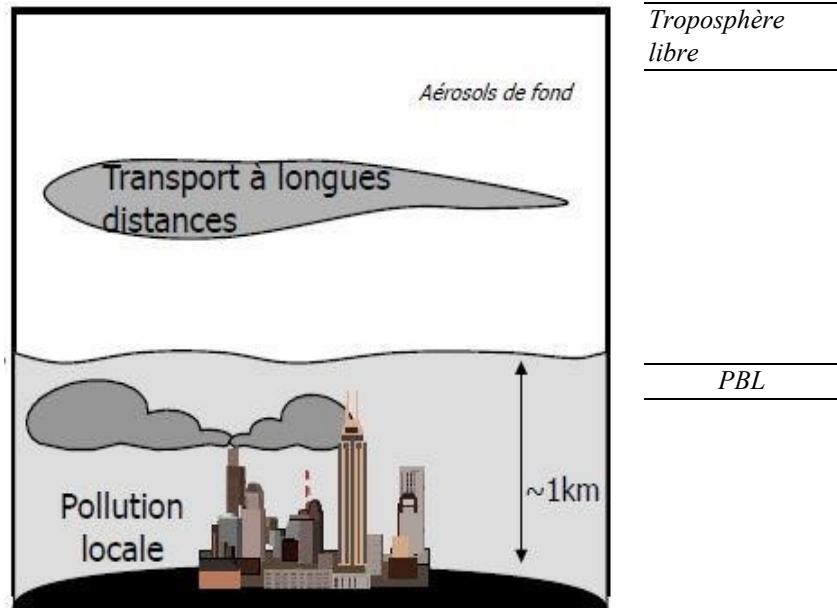


Figure 2-8 Distribution des aérosols dans la troposphère

La concentration des aérosols décroît presque exponentiellement avec l'altitude, avec une hauteur échelle (altitude à laquelle la concentration n'est que le tiers environ de celle proche de la surface terrestre) entre 1 et 2 km.

## 2.3 Propriétés optiques des aérosols

Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les propriétés optiques des aérosols sont l'élément clé pour les applications de la télédétection à la cartographie des microparticules. Nous le passerons en revue par la suite.

### 2.3.1 Coefficient d'extinction

Il exprime les pertes par absorption et diffusion de l'intensité d'un faisceau du rayonnement (longueur d'onde :  $\lambda$ ) par les particules de l'aérosol le long d'un trajet de longueur unitaire dans l'atmosphère (exprimé en  $\text{cm}^{-1}$  ou  $\text{km}^{-1}$ ) :

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{dif}(\lambda) + \sigma_{abs}(\lambda) \quad (2.1)$$

### 2.3.2 Profondeur optique

La profondeur ou épaisseur optique des aérosols (AOD ou AOT) est le coefficient d'extinction intégré dans un trajet vertical entre deux altitudes quelconques (adimensionnelle). La profondeur optique totale de l'atmosphère est calculée de la surface jusqu'au sommet de l'atmosphère :

$$AOD(\lambda) = \delta(\lambda) = \int_0^{TOA} \sigma_{ext}(\lambda, z) dz \quad 2.2$$

Plus l'AOD est grande plus un photon a de chance de rencontrer des aérosols pendant la traversée de l'atmosphère. L'AOD décroît avec la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ainsi l'impact des aérosols est plus important pour les longueurs d'onde du visible que celle de l'infrarouge (Deschamps, 2013).

### 2.4.3 Albédo de diffusion simple

Étant donnée une interaction entre un photon et une particule, la probabilité que le photon soit diffusé dans une direction quelconque plutôt qu'absorbé (adimensionnel) :

$$\varpi_0(\lambda) = \frac{\sigma_{dif}(\lambda)}{\sigma_{ext}(\lambda)} \quad 2.3$$

### 2.4.4 Coefficient d'Angstrom

Le coefficient d'Angstrom est une mesure de la manière dont les propriétés optiques des aérosols se modifient en fonction de la longueur d'onde (dépendance spectrale). Il est lié à la taille des particules

### 2.4.5 Fonction de phase de diffusion

Elle représente la probabilité qu'un photon, après interaction avec une particule, soit diffusé dans une direction précise (figure2.9).

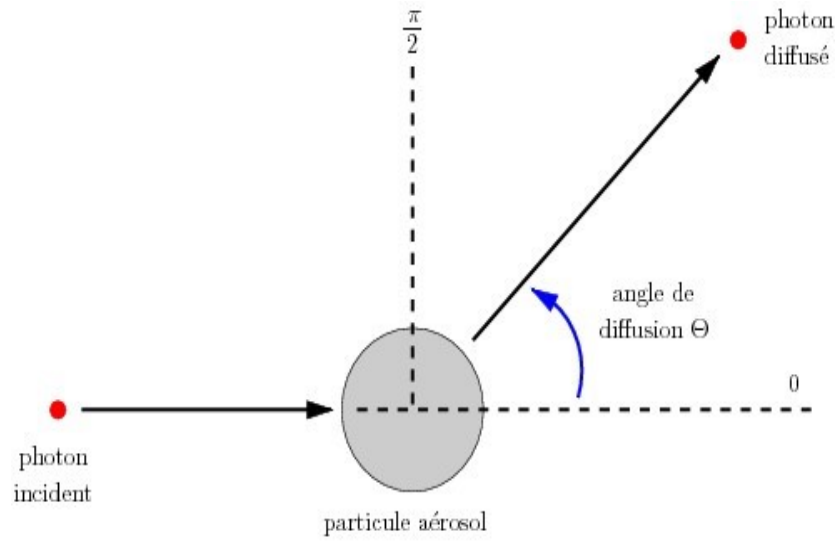


Figure 2-9 Un photon diffusé par une particule est caractérisé par l'angle  $\Theta$  défini entre la direction qu'aurait le photon sans diffusion et sa direction avec diffusion (Seinfeld & Pandis, 2006).

### **3 Cartographie des PM<sub>2.5</sub> par imagerie de télédétection de résolution moyenne à haute : revue de littérature**

La cartographie des PM<sub>2.5</sub> par imagerie de télédétection passe par deux étapes principales :

- Estimation de la profondeur optique des aérosols par analyse d'image
- Mise en application d'un modèle mettant en relation la profondeur optique et la concentration des particules fines près de la surface terrestre mesurée à des stations terrestres par des instruments spécialisés.

Ces deux étapes sont revues par la suite, respectivement section 3.1 et 3.2, en mettant l'accent sur l'imagerie de résolution moyenne à haute comme celle qui sera utilisée dans cette recherche. Finalement, la section 3.3 met l'accent sur les connaissances concernant l'AOD et les PM<sub>2.5</sub> dans la grande région de Montréal, site de notre étude, à titre de référence pour les chapitres subséquents.

#### **3.1 Méthodes d'estimation de l'AOD**

Une littérature volumineuse existe sur les méthodes et techniques d'estimation de l'AOD et dans certains cas d'autres propriétés de l'aérosol (par ex. taille des particules, fonction de phase de diffusion, coefficient d'Angstrom) à partir des données de télédétection. Depuis les années 1990, un effort particulier est mis sur les capteurs satellitaires fournissant de données de résolution kilométrique couvrant la planète avec une résolution temporelle journalière. À l'exception des lidars, comme le capteur CALIOP à bord satellite CALISPO, les capteurs utilisés fonctionnent sur la base du rayonnement solaire dans le domaine des longueurs d'onde entre 0.4  $\mu\text{m}$  et 2.5  $\mu\text{m}$  (figure 3.1). Les systèmes opérant par occultation du disque solaire permettent d'obtenir des informations sur les aérosols stratosphériques et éventuellement sur les aérosols de la haute troposphère. Les autres systèmes peuvent fournir des informations sur les aérosols de la basse troposphère ce qui est d'intérêt pour l'estimation de la concentration des particules fines proche de la surface terrestre. Lenoble *et al.* (2013), entre autres, présentent une revue détaillée de l'instrumentation satellitale de ce type ainsi des approches utilisées pour estimer la profondeur optique des aérosols. Sans

contredit, le capteur le plus utilisé est MODIS à bord des satellites Terra et Aqua de la NASA. Un exemple des produits aérosols générés par l'imagerie MODIS est donné par la figure 3.2. Dans cet exemple on mentionne les deux méthodes de base utilisées pour l'estimation de l'AOD à 550nm : la méthode des cibles obscures (« Dark Target ») et la méthode du bleu profond (« Deep blue »). Ces méthodes ainsi que d'autres méthodes développées avec des images de résolution moyenne à haute seront revues brièvement dans les paragraphes qui suivent.

SENSOR	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
<b>Occultation sensors</b>																					
SAGE(s), HALOE, POAM(s)																					
<b>Nadir sensors on polar orbiting platforms</b>																					
AVHRR(s)																					
TOMS(s)																					
ATSR (s)																					
POLDER(s)																					
SeaWIFS																					
MODIS																					
MISR																					
GOME(s)																					
SCIAMACHY																					
MERIS																					
OMI																					
APS																				*	
VIIRS																					

Figure 3-1 Années d'opération des systèmes satellitaires fournissant des informations sur les aérosols stratosphérique (occultation) et troposphérique (capteurs visant au nadir) (source : Remer et al., 2013).



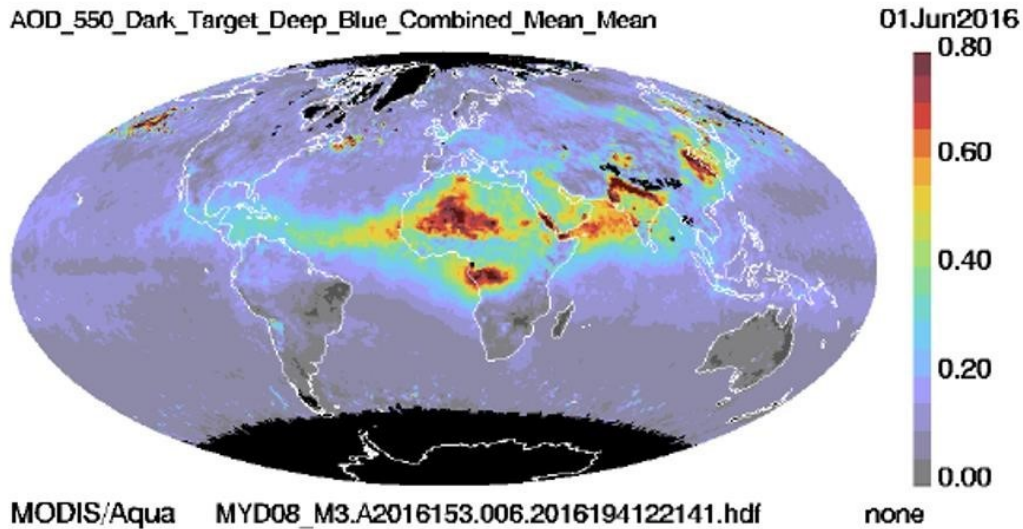


Figure 3-2 Exemple d'une carte d'AOD 550 nm obtenue par l'analyse des images à résolution kilométrique du capteur MODIS (Gupta et al., 2016).

### 3.1.1 La méthode des cibles obscures

Cette méthode a été mise en application depuis longtemps surtout dans le contexte des corrections atmosphériques de l'imagerie satellitale multispectrale de résolution moyenne (par ex. Ahern *et al.*, 1979; Kaufman & Sendra, 1988). Son application demande la présence dans le territoire visé des objets de réflectance très faible. Ahern et al (1979) proposa comme cibles obscures, les lacs d'eau claire en abondance dans le Bouclier canadien. Plus tard, Kaufman & Sendra (1988) ont proposé comme cibles obscures la forêt dense. L'idée de base est que ces objets ayant une réflectance presque nulle dans le spectre solaire (lacs d'eau claire) ou certaines bandes spectrales (forêt dense : bandes dans le bleu et le rouge) permettent de mesurer la luminance provenant uniquement de la diffusion atmosphérique. En effet, la luminance captée au niveau du satellite peut s'écrire en première approximation :

$$L_{sat} = T_{gas}[L_{R+A} + L_{sur}T_{dif}] \quad (3.1)$$

Où :

$L_{sat}$  = Luminance mesurée par le capteur satellital

$L_{R+A}$  = Luminance atmosphérique due aux molécules des gaz (diffusion de Rayleigh) et les aérosols

$L_{sur}$  = Luminance réfléchie par la surface

$T_{gas}$  = Transmittance atmosphérique des gaz

$T_{dif}$  = Transmittance due à la diffusion atmosphérique

Pour une cible obscure en supposant une réflectance nulle nous aurons ainsi :

$$L_{sat} = T_{gas}[L_{R+A}] \quad (3.2)$$

Les calculs des paramètres atmosphériques nécessaires à l'application de l'équation 3.2 se font par un code du transfert radiatif dans le système Terre-atmosphère. En supposant les profils verticaux de température et de pression atmosphériques connus, le code est en mesure de calculer avec précision la part de la luminance atmosphérique due à la diffusion par les molécules des gaz atmosphériques ainsi que la transmittance des gaz atmosphériques. Il est ainsi possible par l'équation 3.2 d'obtenir la luminance due uniquement à la diffusion des aérosols. En supposant une constitution de l'aérosol spécifique du milieu étudié (continental, maritime, urbain, etc.) et donc des propriétés optiques de l'aérosol autre que l'AOD connues, il est ainsi possible d'estimer la profondeur optique de l'aérosol dans les bandes spectrales choisies. Pour ce faire on simule par le code la luminance atmosphérique due aux aérosols en faisant varier leur profondeur optique. Le AOD permettant de simuler une luminance atmosphérique proche, à un seuil près, de la luminance atmosphérique observée est retenu comme l'AOD pour la bande spectrale étudiée.

La procédure d'application de cette méthode varie en fonction de la modélisation du transfert radiatif dans le système Terre-atmosphère adoptée par le code atmosphérique, incluant la description des propriétés de réflexion des cibles obscures. La procédure choisie dans notre cas est décrite avec plus de détails dans les chapitres qui suivent.

### 3.1.2 La méthode de « Deep Blue »

Tel que mentionné, une autre méthode d'estimation de l'AOD, appelée « Deep Blue » (<https://deepblue.gsfc.nasa.gov/>), est expérimentée avec des images à résolution grossière incluant plusieurs bandes dans la partie bleue du spectre (figure 3.3). Dans des milieux où les cibles obscures font défaut, comme les déserts où les milieux urbains, la méthode se base sur des bandes dans le bleu, surtout celle à 412 nm (Deep Blue) ainsi que le rapport des bandes dans le bleu 470/490. Dans le bleu la majorité des objets ont des réflectances faibles, il est donc possible d'isoler plus facilement le signal provenant des aérosols. Le même rapport des bandes dans le bleu ainsi que la bande dans le rouge à 650nm sont utilisés pour des images prises au-dessus des territoires de faible réflectance. Cette méthode n'a pas été utilisée dans notre recherche.

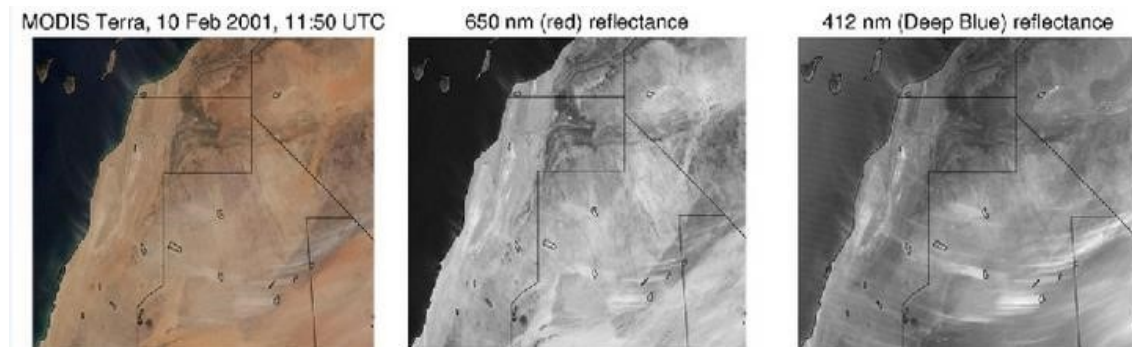


Figure 3-3 A gauche image en couleur normale de MODIS Terra, au centre le même territoire la bande rouge à 650nm et à droite la bande du bleu profond 412nm. Les caractéristiques de l'aérosol sont nettement plus visibles dans le bleu profond que dans le rouge (<https://deepblue.gsfc.nasa.gov/science>)

### 3.1.3 La méthode des ombres

La méthode nécessite la présence des surfaces de réflectance homogène avec une partie dans l'ombre et l'autre éclairée par le soleil. L'idée de base est que la différence entre les luminances mesurées dans la partie éclairée et la partie ombragée est égale à la luminance de surface directement transmise au capteur, en supposant que la luminance atmosphérique ainsi que la luminance réfléchi due au firmament sont égales dans les deux portions.

Comme dans le cas des cibles obscures, en se servant d'un code atmosphérique, par une procédure itérative il est possible d'établir la profondeur optique des aérosols qui aurait

donné une transmittance diffuse des aérosols égale, à un seuil près, à celle estimée par la comparaison partie ombragée/partie éclairée (par ex. Thomas *et al.*, 2009). Bien que cette méthode ait un intérêt pour les milieux urbains comme Montréal, notre site à l'étude, nous ne l'avons pas expérimentée. La raison est que nous pouvons localiser des surfaces couvertes d'arbres avec une densité suffisante pour être considérer des cibles obscures, comme nous le verrons dans les chapitres subséquents.

## 3.2 Relations entre AOD et PM<sub>2.5</sub>

La plupart des études visant l'estimation des concentrations des PM<sub>2.5</sub> à partir des images de télédétection sont effectuées à l'aide de l'imagerie satellitale de résolution kilométrique comme celle provenant des capteurs MODIS ou MISR (Figure 3.1). Dans les paragraphes qui suivent nous présenterons une revue de ces études ainsi que de quelques études effectuées avec les images de résolution moyenne à haute.

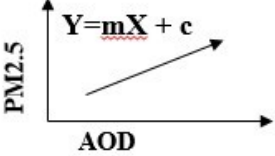
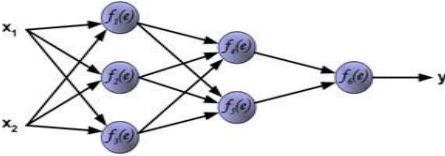
### 3.2.1 Imagerie de résolution grossière

Les méthodes proposées pour établir les relations entre AOD (550 nm) estimée par l'imagerie de résolution grossière et les concentrations des PM<sub>2.5</sub> sont classées par Gupta *et al.* (2018)<sup>2</sup> en 3 catégories, nommément : a) les méthodes de régression simple ou multiple; b) les méthodes d'intelligence artificielle; et c) l'échelonnement des modèles de distribution verticale des aérosols (Tableau 3.1). Une revue exhaustive des études effectuées avec ces méthodes jusqu'aux années 2015 est donnée par (Chu *et al.*, 2016).

---

<sup>2</sup> Gupta P., Follette-Cook, M., Duncan B. (2018) *Theoretical Basis for Converting Satellite Observation to Ground-Level PM<sub>2.5</sub> Concentrations*, Power point presented in NASA Remote Sensing for Air Quality Applications, March 20-23, Jakarta, Indonesia, [https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/Jakarta18/D2P4\\_AOD\\_PM.pdf](https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/Jakarta18/D2P4_AOD_PM.pdf) (dernière consultation décembre 2019)

Tableau 3-1 Méthodes utilisées pour établir la relation entre l'AOD et les PM<sub>2.5</sub>

Formulation	Méthode
	Régression linéaire avec deux variables
$PM_{2.5} = \beta_0 + a * AOD + \sum_{n=1}^m \beta_n * M_n$	Régression linéaire multi-variables ( $M_n$ = autres facteurs)
$PM_{2.5} = \frac{\text{Concentration prédite par le modèle}}{\text{AOD prédit}} \times \text{AOD estimé par satellite}$	Modèle de prédiction
	Réseaux de neurones

La méthode de régression simple est la méthode la plus simple à appliquer. La force de la relation établie dépend de plusieurs facteurs dont le niveau d'agrégation des mesures des  $PM_{2.5}$  (horaire, journalière, hebdomadaire, saisonnière, etc.). À titre d'exemple, Gupta et Christopher (2008) examinent les données d'une seule station terrestre de mesure des  $PM_{2.5}$  et les AOD calculés par la portion des images MODIS comprenant cette station sur une période de 7 ans. Ils établissent deux relations linéaires selon le niveau d'agrégation des données des  $PM_{2.5}$  :

$$PM_{2.5} \text{ (moyenne journalière)} = 15.8 + 27.5 \times AOD ; \text{ coef. de corrélation} = 0.52$$
$$PM_{2.5} \text{ (moyenne horaire)} = 8,8 + 29,4 \times AOD ; \text{ coef. de corrélation} = 0.62$$

Un autre facteur qui peut influencer la force de la relation entre AOD et  $PM_{2.5}$  peut être la position géographique. En effet, Engel-Cox *et al.* (2004) démontrent que les coefficients de corrélation entre le AOD provenant de MODIS et les mesures in situ de  $PM_{2.5}$  sont meilleurs dans la partie Est des États-Unis que dans la partie Ouest (Figure 3.4). La raison principale évoquée pour expliquer cet état des faits est que dans l'est les profils verticaux des aérosols sont passablement stables est que dans l'ouest la composition des aérosols et leurs profils verticaux sont très variables dues notamment à des événements fréquents de transport d'aérosol en altitude. Ainsi, même si l'AOD totale estimée est fort, ces événements ne sont pas nécessairement captés par des stations de mesure en surface des  $PM_{2.5}$  (Gupta et Christopher, 2009a).

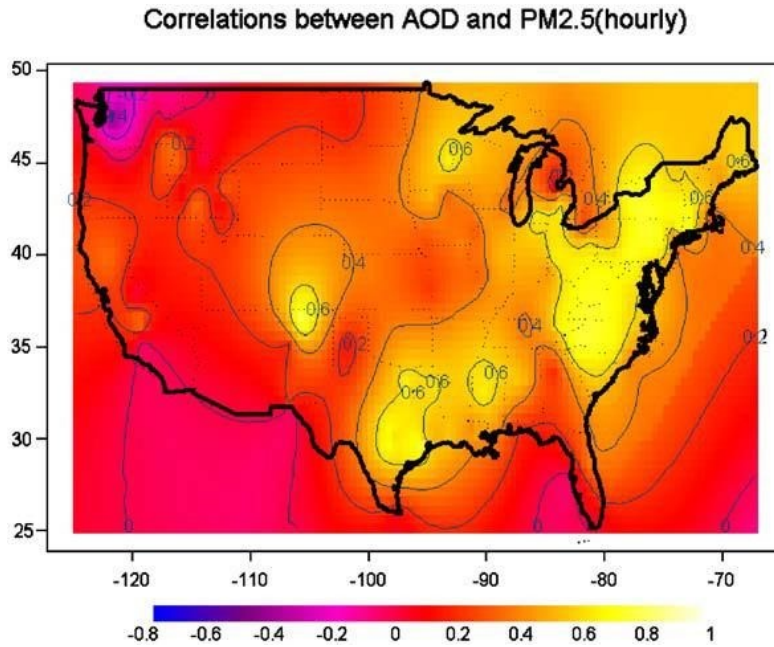


Figure 3-4 Force de la relation entre PM<sub>2.5</sub> (mesurées in situ) et l'AOD-MODIS (source : Engel-Cox et al., 2004).

D'autres facteurs qui peuvent influencer la force de la relation entre PM<sub>2.5</sub> et AOD seraient associés aux conditions météorologiques. Un modèle de régression intégrant de tels paramètres peut ainsi en principe offrir une meilleure qualité d'estimation des PM<sub>2.5</sub>. À titre d'exemple Liu *et al.* (2007) proposent le modèle de régression logarithmique suivant :

$$[PM_{2.5}] = e^{\beta_0 + \beta_1(TEMP) + \beta_2(DIR) + \beta_3(NONSPRING)} \times WIND^{\beta_4} \times PBL^{\beta_5} \times AOT^{\beta_6 + \beta_7 \times NONSPRING}$$

où

- TEMP la température de l'air (mesurée à 2 m au-dessus de la surface) ;
- DIR la direction du vent (variable catégorique : EST, SUD, OUEST, NORD)
- NONSPRING la saison (variable binaire : mars à mai, autres mois)
- WIND la vitesse du vent (mesurée à 10 m au-dessus de la surface)
- PBL la hauteur de la couche de mélange
- AOT l'épaisseur (ou profondeur) optique estimée par MODIS.

Des modèles de régression linéaire multiple permettent aussi d'intégrer des paramètres météorologiques. Gupta et Christopher (2009a) présentent et discutent de tels modèles. Ils démontrent que l'ajout dans les modèles des paramètres météorologiques comme la température, l'humidité relative ou la vitesse du vent, améliorent dans l'ensemble du continent américaine la relation entre AOD et  $PM_{2.5}$  (figure 3.5).

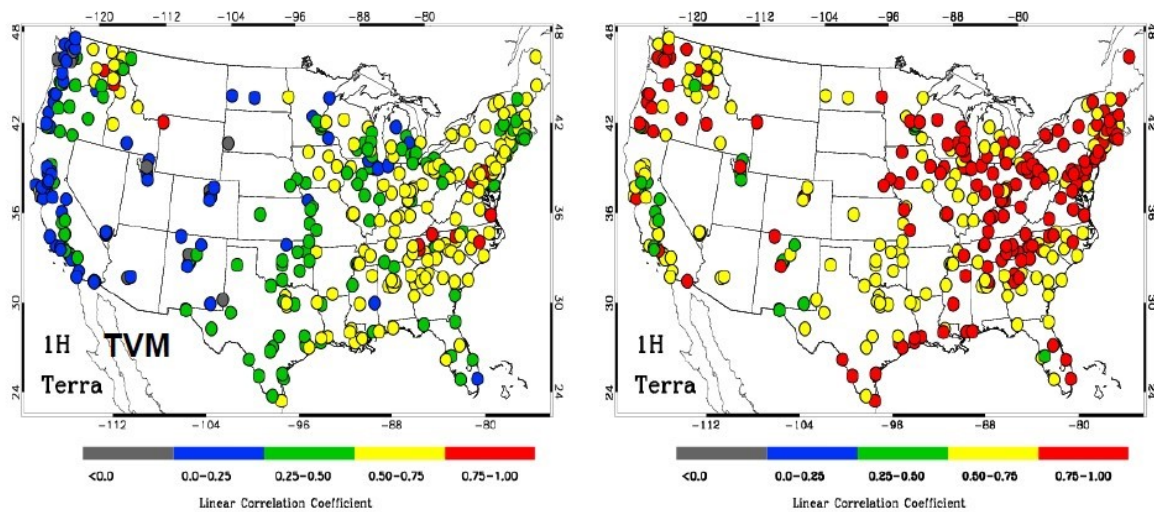


Figure 3-5 Coefficients de corrélation entre les  $PM_{2.5}$  estimés par l'AOD de MODIS et les  $PM_{2.5}$  mesurées à des stations terrestres : à gauche  $PM_{2.5}$  estimés par régression linéaire simple et à droite  $PM_{2.5}$  estimés par modèle de régression linéaire multiple intégrant des données météorologiques (source : Gupta P., Follette-Cook, M., Duncan B. (2018) *Theoretical Basis for Converting Satellite Observation to Ground-Level  $PM_{2.5}$  Concentrations*, Power point presented in NASA Remote Sensing for Air Quality Applications, March 20-23, Jakarta, Indonesia, [https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/Jakarta18/D2P4\\_AOD\\_PM.pdf](https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/workshops/Jakarta18/D2P4_AOD_PM.pdf) (dernière consultation décembre 2019)

Les mêmes auteurs (Gupta et Christopher, 2009b) présentent un réseau de neurones comme une alternative au modèle de régression multiple. Le réseau, de type perceptron multicouche, reçoit dans sa couche d'entrée les « stimuli » décrivant la position géographique, le mois, l'AOD de MODIS, la vitesse du vent, l'humidité relative, la hauteur de la couche de mélange et la température. Dans la couche de sortie l'on obtient l'estimation de la moyenne horaire et journalière des  $PM_{2.5}$ . Les auteurs comparent les valeurs estimées des  $PM_{2.5}$  avec les mêmes données obtenues par un modèle linéaire simple, multiple et leur réseau de neurones par rapport aux valeurs de  $PM_{2.5}$  mesurées aux stations terrestres. Les coefficients de corrélation par méthode varient en fonction des saisons. En règle générale, les coefficients de corrélation les plus bas sont obtenus avec un modèle de régression



simple n'impliquant que le AOD. Les coefficients varient selon la saison entre environ 0.2 (hiver) et 0.6 (automne) et sont similaires pour les estimations horaires et journalières. Le modèle de régression multiple améliore la qualité d'estimation des PM<sub>2.5</sub>. Les coefficients de corrélation varient maintenant entre environ 0.4 (hiver) et 0.7 (automne) et sont similaires pour les estimations horaires et journalières. Les coefficients de corrélation s'améliorent davantage avec le réseau de neurones particulièrement dans le cas des moyennes journalières avec des coefficients de corrélation entre environ 0.5 (hiver) et 0.8 (automne).

Finalement, l'estimation des PM<sub>2.5</sub> par rééchelonnement d'un modèle de distribution verticale des aérosols (modèles chimiques de transport), comme les modèles GEOS-CHEM ou GOCART, ajustés localement et temporellement prend la forme simple (Liu *et al.* 2004; van Donkelaar *et al.* 2006) :

$$PM_{2.5} = \frac{\text{Concentration prédite par le modèle}}{\text{AOD prédit}} \times \text{AOD estimé par satellite}$$

### 3.2.2 Imagerie de résolution moyenne à haute

Les études avec des images à résolution moyenne à haute sont peu nombreuses. Celles consultées suivent l'approche par modèles statistiques. Parmi les premières études nous pouvons citer celle de Saleh *et al.* (2007) qui propose la relation suivante dans le cas de données TM-Landsat :

$$PM_{10} = e_0 + e_1 R_{atm1} + e_2 R_{atm3}$$

où les coefficients  $e$  sont définis empiriquement,  $R_{atm1}$  et  $R_{atm3}$  sont les réflectances de l'atmosphère (incluant aérosol et molécules) respectivement dans les bandes 1 (bleu) et 3 (rouge). Ces réflectances sont évaluées en éliminant le signal provenant de la surface. La figure 3.6 montre la relation établie entre PM<sub>10</sub> estimées par leur modèle et PM<sub>10</sub> mesurées in situ.

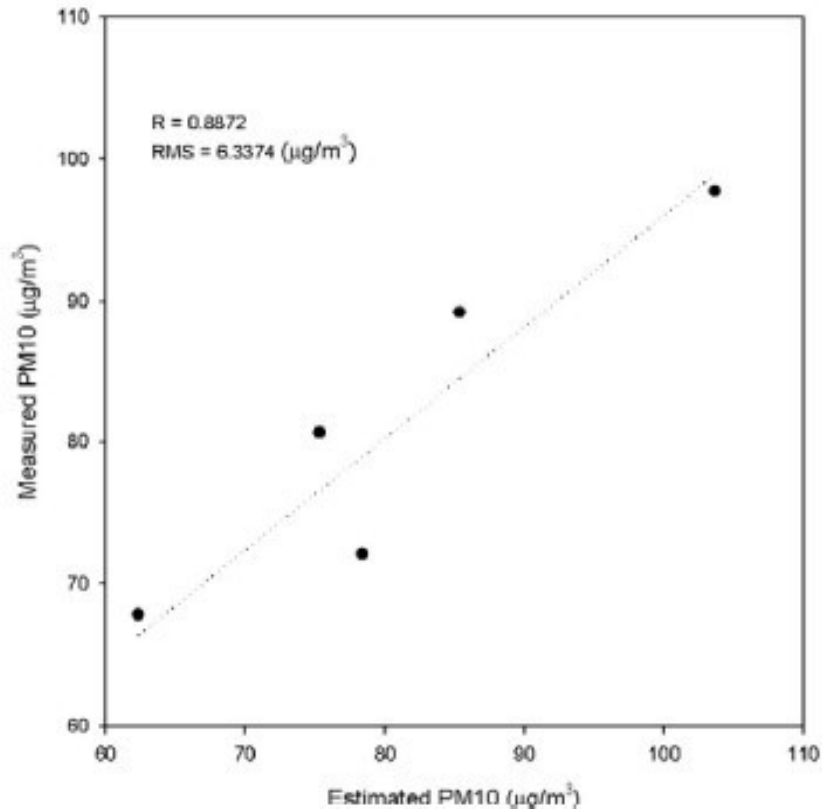


Figure 3-6 Relation entre les PM10 estimée par des données TM-Landsat et les PM10 mesurées in situ (source Saleh et al., 2007).

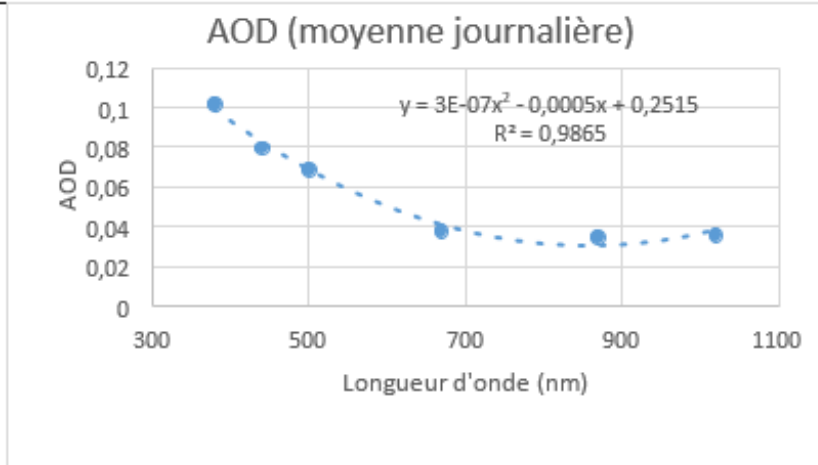
Récemment, Zhang *et al.* (2018) utilisent l'imagerie du satellite Gaofen-1 à 160 m de résolution spatiale pour l'estimation de l'AOD. Ils proposent des modèles statistiques de type modèle linéaire à effets mixtes emboîtés (LME) pour décrire la relation entre PM<sub>2.5</sub> et AOD. Comme précédemment des résultats statistiquement significatifs sont obtenus en introduisant dans les modèles des variables météorologiques comme la vitesse de vent, la température ou la hauteur de la couche de mélange et des variables liées à la couverture du sol (indice de végétation).

### 3.3 Connaissances sur la région de Montréal

#### 3.3.1 Profondeur optique

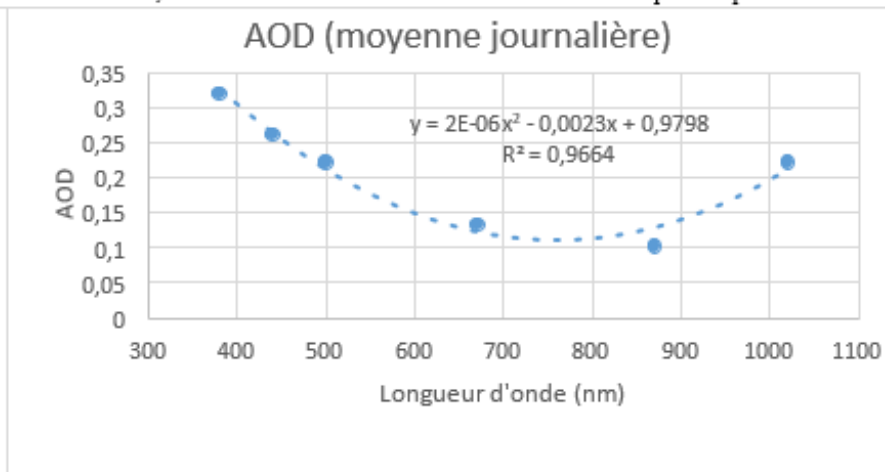
Nos connaissances sur la profondeur optique des aérosols dans la grande région de Montréal proviennent des campagnes de mesures in situ ou des analyses des mesures effectuées dans les différentes stations permanentes du réseau AEROCAN (AERONET).

Dans le cas des mesures in situ, Ahern *et al.* (1991) mentionnent des AOD à 550 nm mesurées près de la ville d'Ottawa aux alentours de 0.06 pour les jours clairs et de 0.33 pour des jours brumeux. Teillet et Fedosejevs (1995) pour leur part citent diverses études qui situent la profondeur optique des aérosols à 550 nm pour des milieux hautement urbanisés à 0.1 en hiver et à 0.2 en été. Bouroubi (2009) rapporte des mesures effectuées pendant l'été avec le photomètre MICROTOPS à Saint-Jean-sur-Richelieu (une quarantaine de kilomètres au Sud-Est de Montréal) qui variaient entre 0.07 et 0.4 environ. En 2012 il y a eu une campagne de mesures d'Environnement Canada à Montréal à l'aide du photomètre CIMEL de juillet au début septembre. Le chapitre 4 décrit avec plus de détails cette campagne dont les mesures ont été utilisées pour valider notre procédure de calcul de l'AOD (chapitre 5). La figure 3.7 présente quelques exemples des mesures de l'AOD dans six longueurs d'onde (380 nm ; 440nm ; 500nm ; 670nm ; 870nm ; 1020nm) obtenues par CIMEL, moyennées sur une base journalière. Nous pouvons observer que les mesures suivent une tendance polynomiale de second degré avec un fort coefficient de détermination. Schuster *et al.* (2006) mentionnent des résultats d'une série d'études qui établissent une relation AOD-longueur d'onde (logarithmes naturels) polynomiale de second degré. Le signe du coefficient du terme du second degré (la courbure) est, selon des études rapportées par ces auteurs, un indicateur de la taille des particules. Ainsi un coefficient négatif indiquerait la dominance des particules fines et un coefficient positif indiquerait une contribution significative des particules grossiers. Dans les exemples de la figure 3.7 on peut évaluer que l'AOD 550 nm varie approximativement entre 0.06 et 0.175.



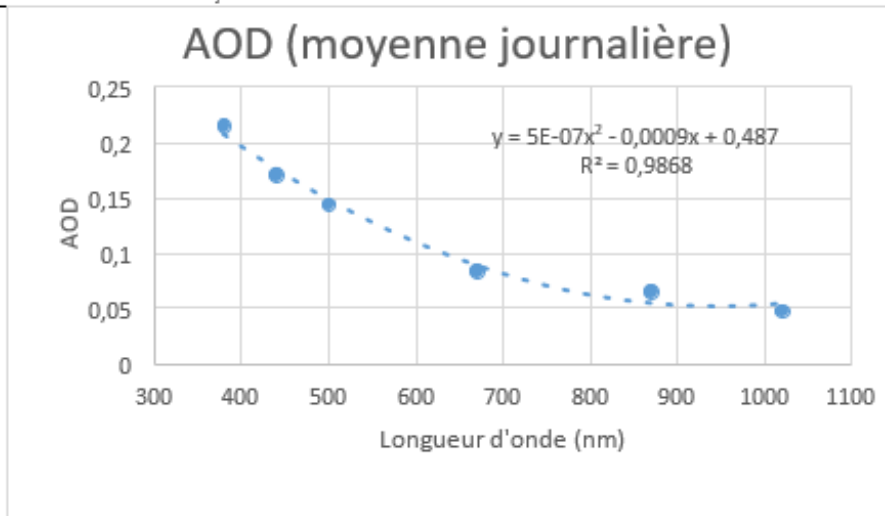
Conditions météorologiques pour le jour du jeudi 19-07-2012 : Température maximale 23 C; Humidité relative : assez stable aux alentours de 50%; vents du nord-ouest à des vitesses variables ne dépassant pas les 15 km/h

: assez



Conditions météorologiques pour le jour du dimanche 22-07-2012 : Température maximale 30 C; Humidité relative : assez stable aux alentours de 50%; vents du sud-ouest à des vitesses assez stables aux alentours de 20 km/h

dité



Conditions météorologiques pour le jour du mercredi 22-08-2012 : Température maximale 26 C; Humidité relative : variable entre 40 et 70%; vents du sud-ouest à des vitesses assez stables aux alentours de 20 km/h

Figure 3-7 Exemples des mesures de l'AOD spectral (voir texte) de la campagne de mesures à Montréal d'Environnement Canada en 2012 (données inédites).

Concernant l'analyse (interpolation) des mesures effectuées à des stations terrestres du réseau AEROCAN, Bokoye *et al.* (2001) évalue l'AOD pour la région de Montréal, pour une période d'une vingtaine d'années, entre 0.08 et 0.15 en moyenne dépendant de la saison. À la station AEROCAN la plus près de Montréal, CARTEL de l'Université de Sherbrooke, la moyenne mensuelle pour l'année 1999 variait de 0.045 à 0.136 (500 nm). Récemment Sioris *et al.* (2017) présentent une étude similaire à celle de Bokoye *et al.* en introduisant des nouvelles stations AEROCAN. La figure 3.8 montre les tendances observées pour une période de vingt ans pour six stations AEROCAN situés au sud-est du Canada, incluant le CARTEL ainsi que Toronto métropolitain. Les statistiques de la figure 3.8 confirment les résultats des études présentées ci-haut, à savoir, un AOD peu variable et bas (<0.15) de janvier à avril et d'octobre à décembre, et un AOD plus variable (particulièrement en été) avec des médianes entre 0.15 et 0.2.

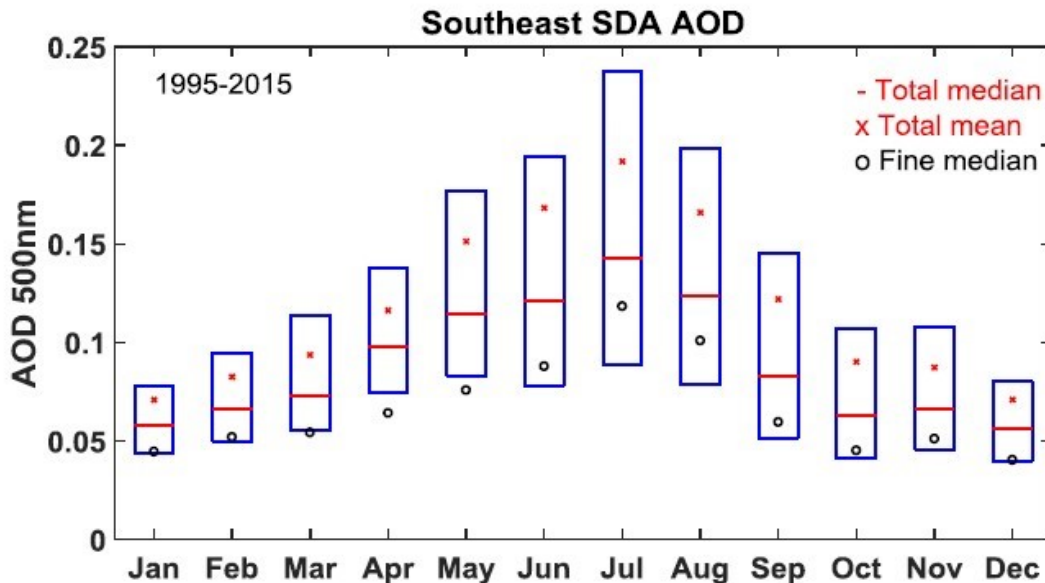


Figure 3-8 Statistiques mensuelles pluriannuelles sur les AOD mesurées à des stations AEROCAN situées dans la partie sud-est du Canada (source : (E.Sioris, Abboud, E.Fioletov, & A.McLinden, 2017)

### 3.3.2 Relation AOD et PM2.5

Peu d'études ont été effectuées dans la région métropolitaine sur la relation entre PM<sub>2.5</sub> et AOD. Bokoye (communication personnelle) a analysé les mesures d'AOD effectuées en 2012 lors de la campagne d'Environnement Canada citée plutôt et les données de PM<sub>2.5</sub> mesurées à une station près du lieu d'implantation de l'appareil CIMEL. La figure 3.9 montre les résultats de régression linéaire simple entre les AOD mesurées aux six longueurs d'onde de CIMEL et les PM<sub>2.5</sub> (base journalière). Les relations établies sont statistiquement significatives avec des coefficients de détermination relativement bas de 30 et 50%. Tel qu'attendu les relations sont plus forte dans les plus petites longueurs d'ondes.

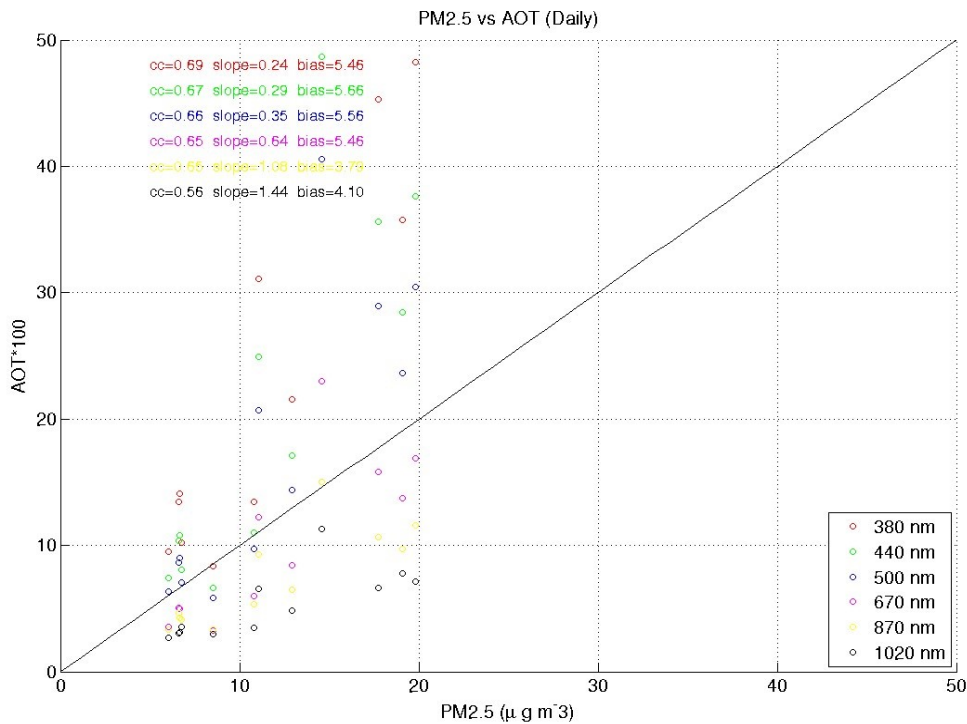


Figure 3-9 Relations entre AOD spectrale et PM<sub>2.5</sub> établies avec les données mesurées en été 2012 à Montréal (voir texte ; source : Bokoye A., communication personnelle).

Sioris *et al.* (2017) dans leur étude citée plus haut, analysent les données sur les AOD d'AEROCAN et les PM<sub>2.5</sub> mesurées à des stations de mesure de la qualité de l'air à travers le Canada. Les données sont soumises à une série d'analyses incluant la corrélation spatiale,

l'incidence de la direction des vents et des événements épisodiques. La conclusion d'un intérêt pour notre recherche est que dans les sites les plus pollués au Canada (ex.

Toronto métropolitain) soumis à des vents venant du sud, les moyennes horaires d'AOD et des PM<sub>2.5</sub> sont fortement corrélées.





## 4 Méthodes, données et prétraitements

La figure 4.1 montre sous forme d'organigramme les étapes méthodologiques de notre recherche. Une fois les sites d'étude et les images choisis on développe et on teste le logiciel d'estimation de l'AOD. Une fois cette étape complétée on procèdera à l'application du logiciel avec d'autres images. Les résultats sur les AOD obtenus seront comparés par la suite aux données sur les concentrations des PM<sub>2.5</sub> mesurées aux stations du réseau de mesure de la qualité de l'air du Québec (RSQA) sur l'île de Montréal afin d'étudier le potentiel d'utiliser le AOD comme proxy des PM<sub>2.5</sub>. Des explications sur chaque étape sont données par la suite.

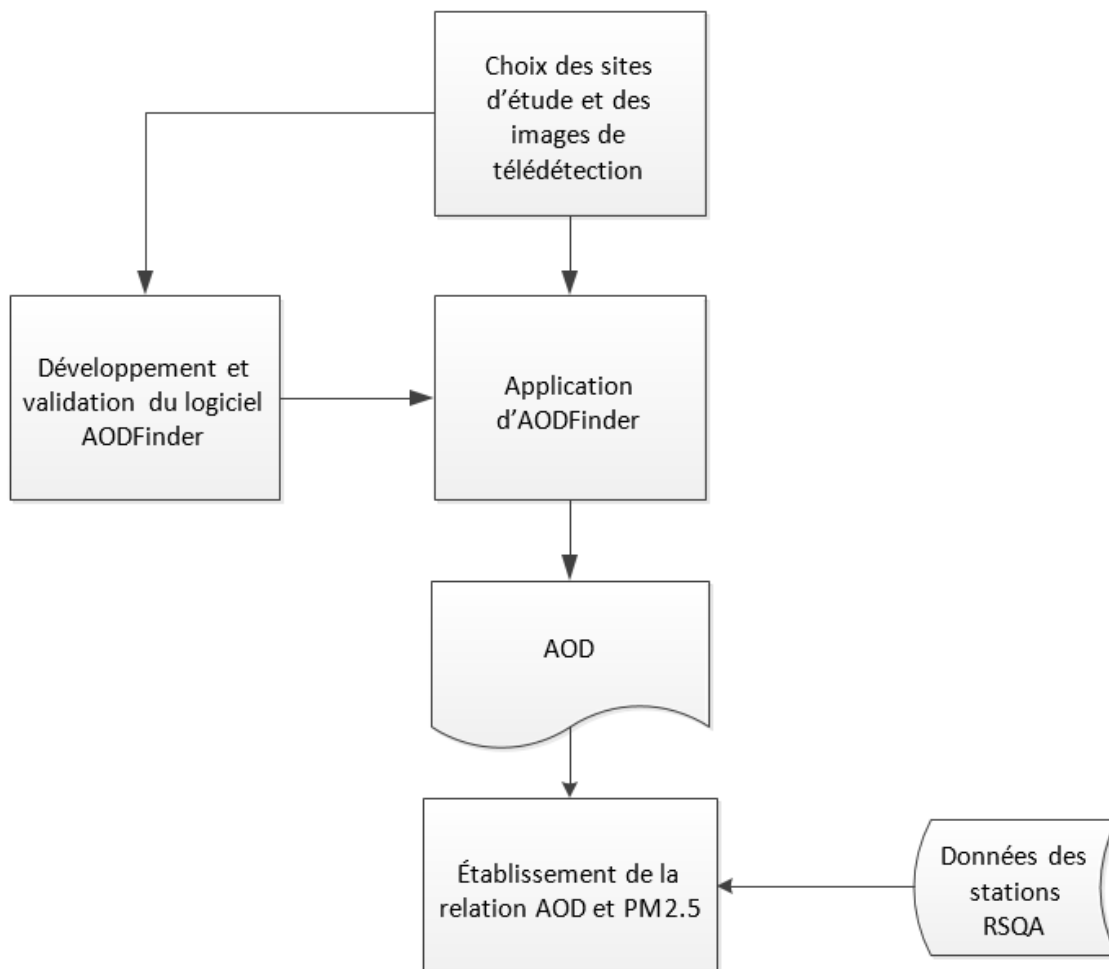


Figure 4-1 Approche méthodologique de la recherche.

## 4.1 Sites à l'étude

Nos sites à l'étude se trouvent dans l'agglomération (île) de Montréal et ses environs, territoire d'intérêt de l'Observatoire spatial urbain. Montréal est reconnu pour sa forte concentration avec une population estimée à 2 029 400 habitants en 2018 et une densité d'environ 4 060 habitants/km<sup>2</sup> (ISQ, 2019<sup>3</sup>). En ce qui a trait aux concentrations de PM<sub>2.5</sub> elle se classe derrière l'agglomération industrielle de Sarnia en Ontario avec une concentration moyenne de 11.2 microgrammes par mètres cube d'air contre 12.7 microgrammes à Sarnia (OMS, 2018<sup>4</sup>).



Figure 4-2 Chalet de Mont-royal montrant la brume au centre-ville de Montréal (source : Réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal, [www.rsqua.qc.ca](http://www.rsqua.qc.ca)).

## 4.2 Images de télédétection

Une série d'images à résolution moyenne à haute a été disponible pour notre recherche. Certaines de ces images, acquises au début de septembre 2012, ont servi à la validation du logiciel « AODFinder » d'estimation de l'AOD développé dans le cadre de cette recherche (section 4.4). Leur choix de ces images sont expliquées dans la section 4.2.1. Le reste

<sup>3</sup> ISQ (Institut de la statistique du Québec) Le bilan démographique du Québec, Édition 2019.

<sup>4</sup> <https://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

d'images, acquises l'été 2016, a servi à l'application du logiciel. La section 4.2.2 présente leurs caractéristiques.

#### 4.2.1 Données pour la validation du logiciel

L'année 2012 marque le début du projet « Observatoire Spatial Urbain » dont nous avons fait mention au chapitre 1. Dans le cadre de ce projet, Environnement Canada avait installé le photomètre solaire CIMEL sur le toit de l'ancien Pavillon de géographie (520 Côte-SteCatherine ; figure 4.3). Ce photomètre sert à l'estimation de la profondeur optique totale des aérosols à six longueurs d'onde : 380 nm, 440 nm, 500 nm, 670 nm, 870 nm et 1020 nm. L'appareil a été en opération entre le 18 juillet 2012 et le 3 septembre 2012 et les mesures ont été prises du lever au coucher du soleil à toutes les 15 minutes environ. Les AOD estimées par CIMEL pouvaient ainsi servir à la validation des résultats de notre logiciel.

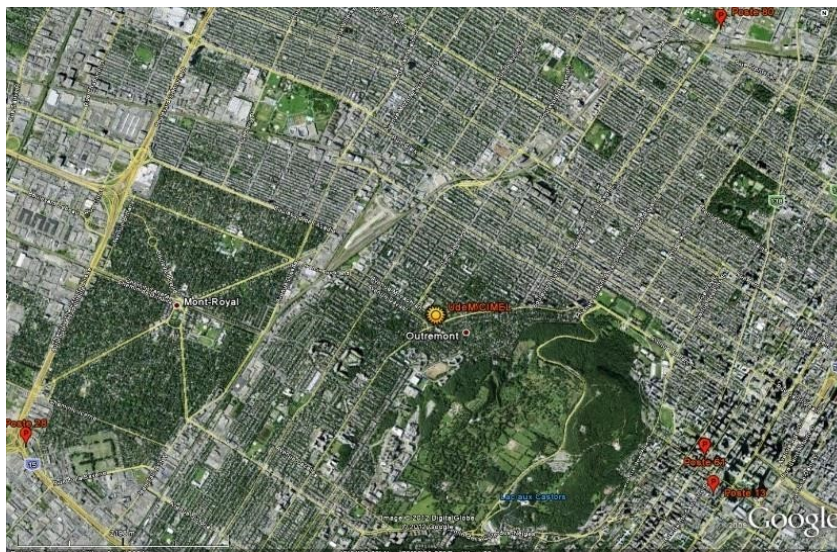


Figure 4-3 Installation du photomètre solaire CIMEL l'été 2012.

## Images à résolution moyenne

Malheureusement à cause de la météorologie et de la disponibilité des images à résolution moyenne, seule une image ETM+ de Landsat-7 (LE70150282012245EDC00) (figure 4.4a) acquise le 1 septembre 2012 était disponible pour la période d'opération du CIMEL. Cette image est orthorectifiée par le USGS (grille UTM), le fournisseur d'images Landsat. Il faut noter que les images ETM+ acquises depuis 1983 présentent des anomalies avec des lignes de balayage manquantes à cause du bris d'un miroir. La figure 4.4a présente la portion utilisée de cette image. La surface couverte par cette portion fait approximativement 9700 km<sup>2</sup>.

Les peuplements forestiers denses tels qu'indiqués sur des cartes forestières du Québec à l'échelle 1 :20 000 ont servi comme cibles obscures. Les polygones en format vectoriel ont été transformés en format raster avec le pixel fixé à 30 m x 30 m pour la concordance avec l'image Landsat. Les polygones à l'extérieur de la portion couverte par l'image ainsi que les parties des polygones à l'intérieur des lignes de balayage manquantes de l'image ont été masquées. Les polygones restant ont été numérotés pour faciliter les opérations subséquentes (figure 4.4b). Au total quelques 9364 polygones ont été introduits dans le programme pour l'estimation de l'AOD. Les altitudes de terrain nécessaires pour tous les calculs des paramètres atmosphériques ont été introduites par un MNA créé à partir des courbes de niveau des cartes topographiques au 1 :50 000 (Figure 4.4c). Le pixel du MNA a été fixé à 30m x 30 m pour être compatible avec l'image Landsat.

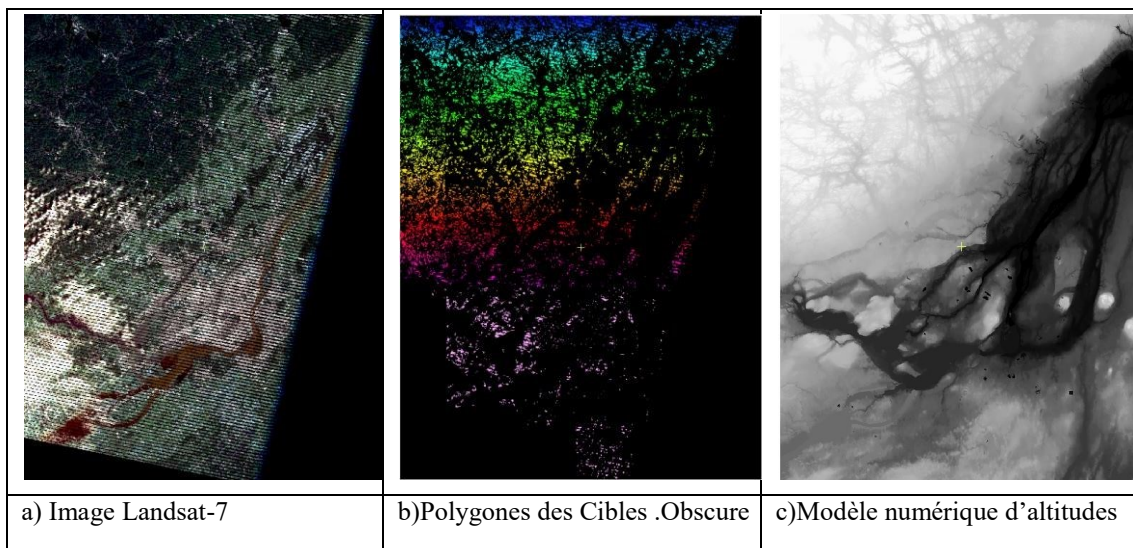


Figure 4-4 Image Landsat-7 en couleur normales (a), polygones des cibles obscures numérotés (b), modèle numérique d'altitude de la zone couverte par l'image.



## Images à haute résolution

Comme images à haute résolution nous nous sommes servis des images aéroportées du capteur hyperspectral CASI-1500 acquises le 2 septembre 2012 couvrant une partie de l'île de Montréal (11 lignes de vol ; figure 4.5). Les images ont été orthorectifiées par ITRES<sup>5</sup> (Projection UTM) à l'aide d'un MNA de résolution submétrique de la Ville de Montréal et le pixel rééchantillonné à 1 m x 1 m. Les images ont été étalonnées par ITRES en unités de radiance spectrale. Le nombre de bandes spectrales était fixé à 72 couvrant la zone spectrale entre 370 nm et 1040 nm (voir annexe). À cause de la présence des nuages par endroit la presque totalité des lignes de vol ont été reprises après un premier passage. Les images orthorectifiées étaient accompagnées des images où il est indiqué l'angle de visée du capteur pour chaque pixel ainsi que les altitudes du terrain. Le MNA provenaient des levés photogrammétriques à partir des images de la caméra numérique Vexcel de très haute résolution effectués par la ville de Montréal.

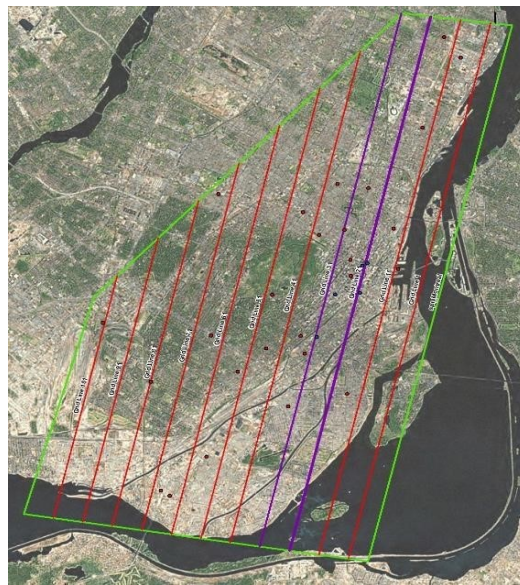


Figure 4-5 Lignes de vol de la mission 2012.

---

<sup>5</sup> ITRES Research Limited est une compagnie privée de prise d'images aéroportées. Son siège est à Calgary, Alberta (Canada)

Dans notre projet deux images ont été utilisées pour la validation du logiciel AODFinder sous des conditions différentes de la position du soleil. Ces images de 2501 x 2501 pixels ont été extraites de la ligne de vol 7 et de sa reprise et couvraient une zone autour de l'ancien Pavillon de géographie de l'Université de Montréal où le photomètre CIMEL était installé. Le tableau 4.1 et la figure 4.6 présentent les caractéristiques de deux images. Les angles de visée variaient de part et d'autre du nadir (zone sombre des images des angles de la figure 4.6) jusqu'à 26° environ (extrémités brillantes des images des angles de la figure 4.6). Concernant les altitudes du terrain, elles variaient de 34 m à 185 m environ. Des polygones de boisés denses, 14 au total, ont été tracés à main levée et utilisés comme cibles obscures pour l'estimation de l'AOD à partir des deux images.

Tableau 4-1 Caractéristiques de la ligne de vol 7, mission 2012 CASI-1500.



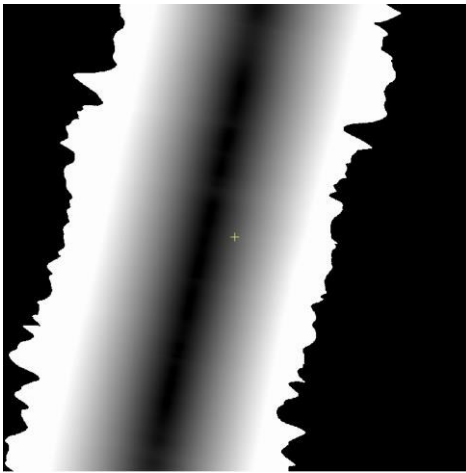
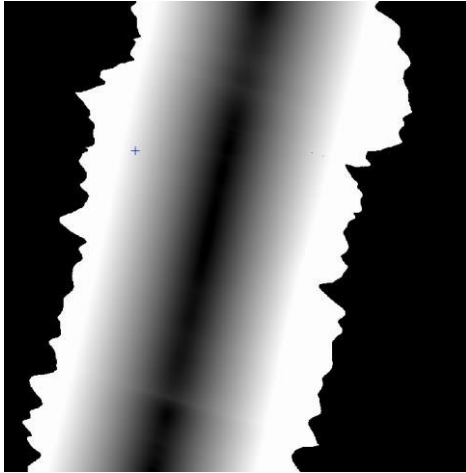
Ligne de vol (7)	Heure locale de passage	Altitude de vol
1 <sup>er</sup> passage	14 :26	6900 pieds (~2103 m)
2 <sup>ème</sup> passage	16 :05	6900 pieds (~2103 m)
1 <sup>er</sup> passage	2 <sup>ème</sup> passage	
		
		

Figure 4-6 Images extraites de la ligne de vol 7 (vrai couleur) et images de l'angle de visée du capteur par pixel.

## 4.2.2 Données pour l'application du logiciel

### Images à résolution moyenne

Comme images à résolution moyenne nous avons décidé d'utiliser celles de Landsat-8 disponibles via le site du USGS. L'idée était de comparer les AOD estimées à partir de

d'une image à résolution moyenne aux AOD calculées à partir des images à haute résolution acquises la même période. Une seule image sans pratiquement pas de nuages au-dessus de l'île de Montréal a été trouvée. Cette image, acquise le 3 août 2016 (LC80150282016216LGN00), a été découpée de la même manière que l'image Landsat-7 de 2012 afin d'utiliser les mêmes données sur les cibles obscures et les altitudes de terrain. La figure 4.7 présente l'image Landsat-8.



Figure 4-7 Image Landsat-8 en vrai couleur

### **Images à résolution haute**

En 2016, entre le 3 août et le 4 septembre, il y a eu une nouvelle couverture cette fois complète de l'île de Montréal avec les capteur CASI-1500 d'ITRES dans le cadre du projet Observatoire spatial urbain. Le capteur a été embarqué dans un aéronef *Piper Aztec (CGNZQ)* spécialement conçu pour la prise de vue aériennes (Figure 4.8). Au total 33 lignes de vol ont été nécessaires pour couvrir l'île de Montréal (Figure 4.9). Les images par ligne de vol ont été orthorectifiées par ITRES selon le système MTM (faisceau 8) utilisé au Québec (Mercator Transverse modifiée) à l'aide d'un MNS de résolution submétrique de la Ville de Montréal et le pixel rééchantillonné à 1 m x 1 m. Les images ont été étalonnées



par ITRES en unités de radiance spectrale et découpées en des tuiles de 2501x2501 pixels (Figure 4.10). Le nombre de bandes spectrales était fixé à 96 couvrant la zone spectrale entre 370 - 1050 nm (voir annexe).

Les images orthorectifiées étaient accompagnées des images où il est indiqué l'angle de visée et l'azimut de visée du capteur pour chaque pixel ainsi que l'altitude de surface (MNS). Comme dans le cas des images de 2012 l'angle de visée varie de part et d'autre du nadir jusqu'à 29 degrés. L'altitude de surface provient des levés LiDAR de haute densité de la Ville de Montréal (Figure 4.11).



Figure 4-8 Aéronef Piper Aztec (C-GNZQ) avec le capteur CASI-1500.

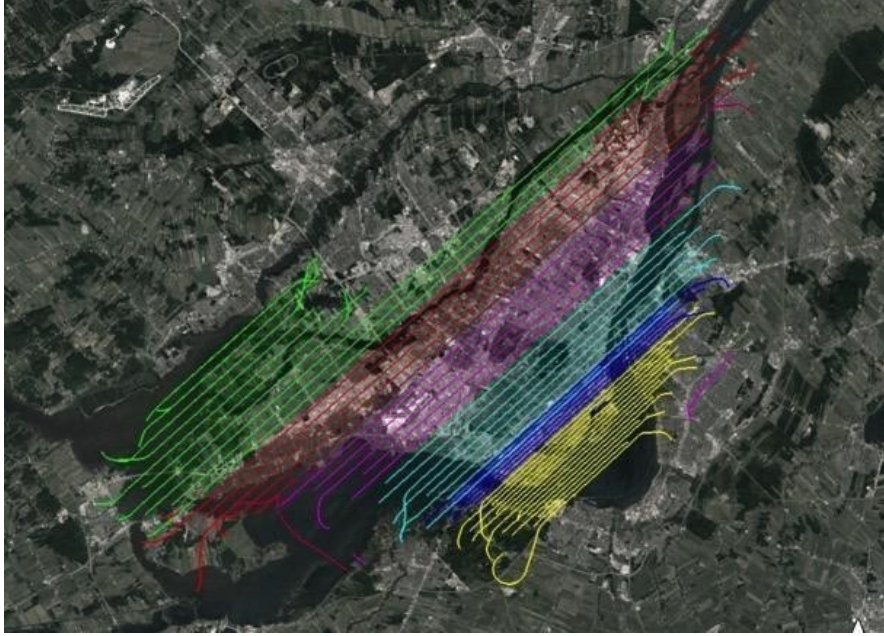


Figure 4-9 Ligne des vols, chaque couleur représente une date différente du survol au-dessus de l'île de Montréal (source Itres2016).

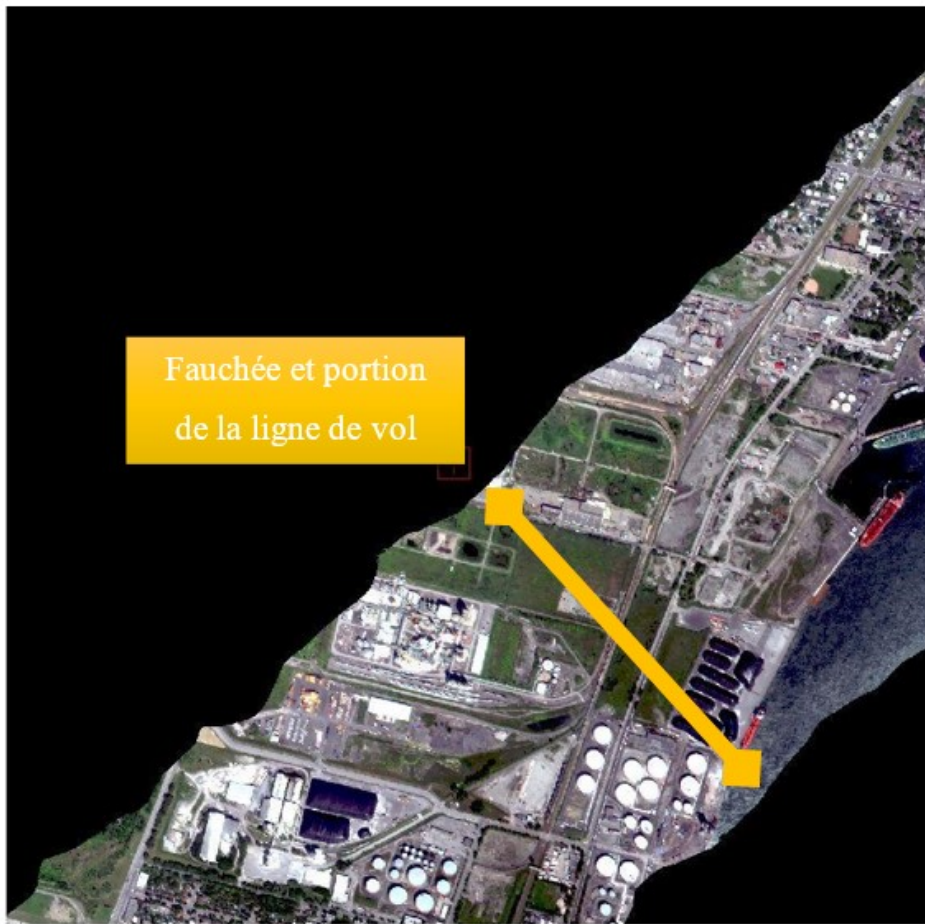


Figure 4-10 Tuile d'image CASI orthorectifiée en couleur normale (bleu : canal 13 à 453nm, vert : canal 27 à 553nm, rouge : canal 41 à 652nm) montrant une portion d'une ligne de vol d'une fauchée d'environ 1200 mètres.

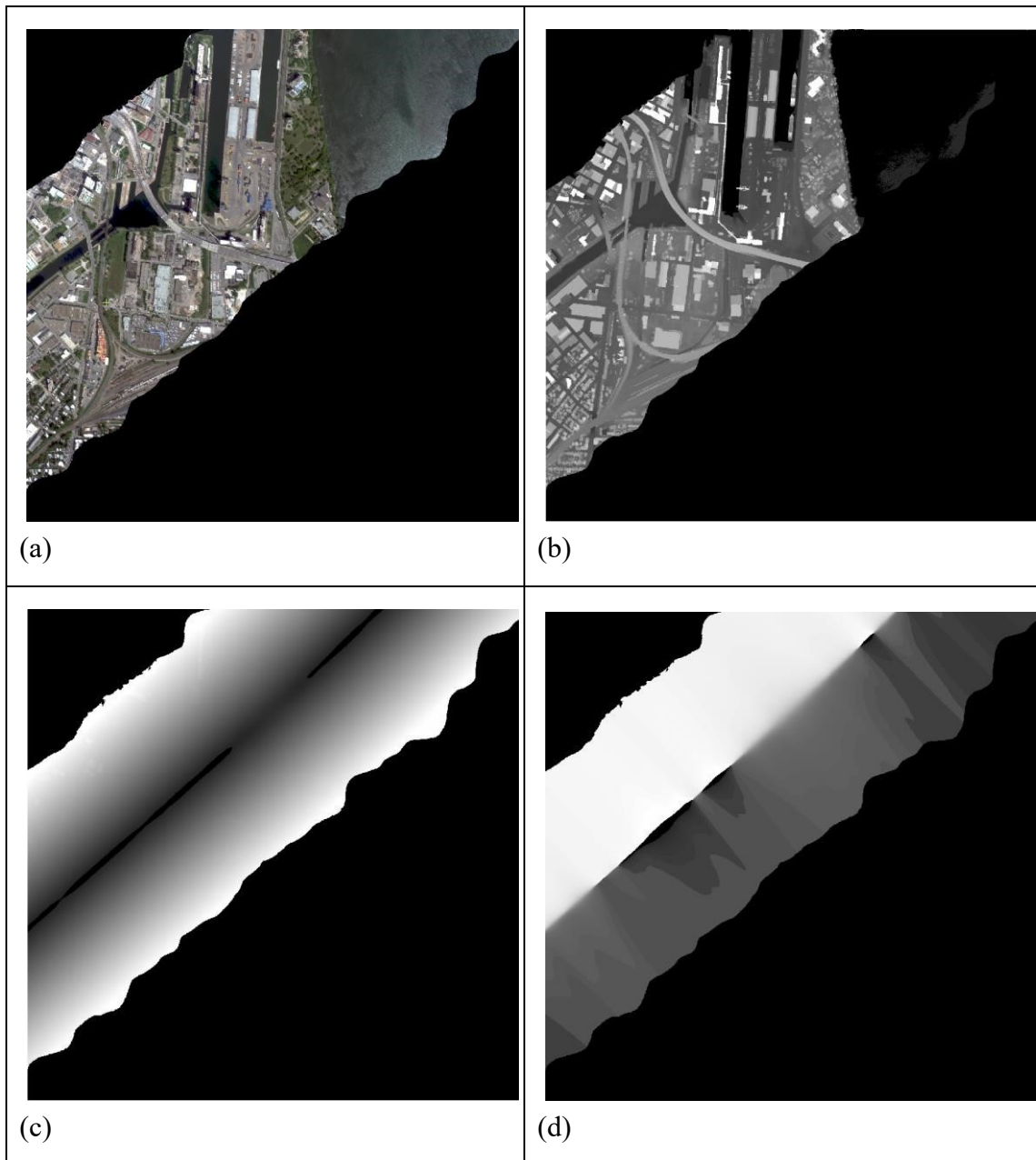


Figure 4-11 Exemple d'une image CASI et des images qui l'accompagnent: a) Image CASI (couleurs normales) ; b) MNS ; c) Angle de visée par pixel ; d) Azimut de visée par pixel.

Concernant les cibles obscures, la ville de Montréal nous a fourni la couche vectorielle représentant les limites des aires boisées (canopée) pour l'agglomération de Montréal. Cette couche a été créée par restitution photogrammétrique des images aériennes (caméra Vexcel) acquises en 2015 (Figure 4.12). Cette couche a été découpée selon les tuiles de

CASI (figure 4.13) et comme précédemment, les polygones en format vectoriel rastérisés (figure 4.14) et numérotés pour faciliter les opérations subséquentes.



*Figure 4-12 Végétation dense (cible obscure) sur l'île de Montréal*



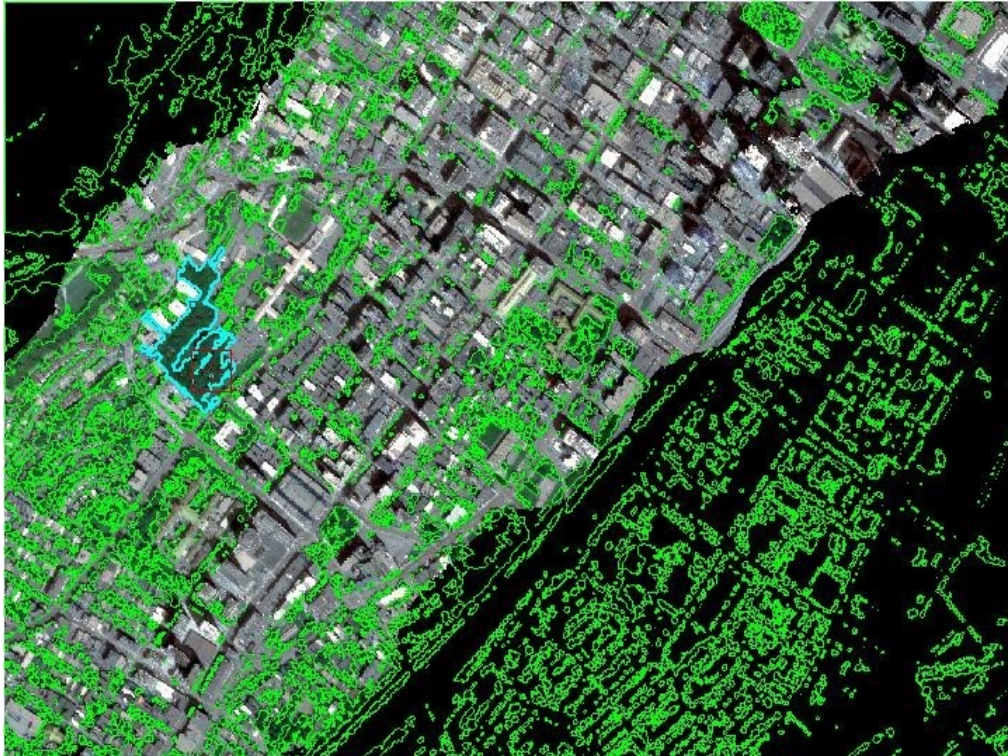


Figure 4-13 Portion des polygones des cibles obscures superposés sur une tuile CASI 2016. Les polygones dans les zones non couvertes par l'image sont automatiquement masqués par le logiciel AODFinder (voir section 4.4).



Figure 4-14 Localisation des cibles obscures sur les images CASI 2016.

### 4.3 Données du réseau de surveillance de la qualité de l'air de Montréal (RSQA)

Onze stations RSQA mesurent les  $PM_{2.5}$  et d'autres polluants d'une façon régulière avec une fréquence horaire. La figure 4.15 montre leur à l'ensemble de l'île de Montréal.

Puisque les données CASI ne couvrent pas la même journée l'ensemble de l'île nous avons décidé de ne considérer que les tuiles qui comprennent au moins une station RSQA à des fins de comparaison AOD estimé par tuile et PM<sub>2.5</sub> mesurés à la station. La liste des tuiles des images CASI qui incluent une station RSQA est donnée par le tableau 4.2.

*Tableau 4-2* Identification des tuiles CASI 2016 utilisées pour l'application du logiciel AODFinder et stations RSQA incluses dans la tuile.

Tuile CASI 2016	Numéro de la station RSQA (voir figure 4.15)
CASI_2016_09_03_091233.h17v3.RAD.Gc	03
CASI_2016_08_20_094254.h15v4.RAD.Gc	31
CASI_2016_08_24_095240.h16v1.RAD.Gc	17
CASI_2016_08_24_092825.h12v1.RAD.Gc	28
CASI_2016_09_02_084745.h13v1.RAD.Gc	29
CASI_2016_08_20_101343.h16v2.RAD.Gc	50-80
CASI_2016_08_23_104834.h15v3.RAD.Gc	55
CASI_2016_08_23_104834.h4v1.RAD.Gc	99
CASI_2016_08_24_093949.h10v3.RAD.Gc	66
CASI_2016_08_04_113627.h15v3.RAD.Gc	103

# Stations d'échantillonnage du RSQA sur l'île de Montréal en 2017

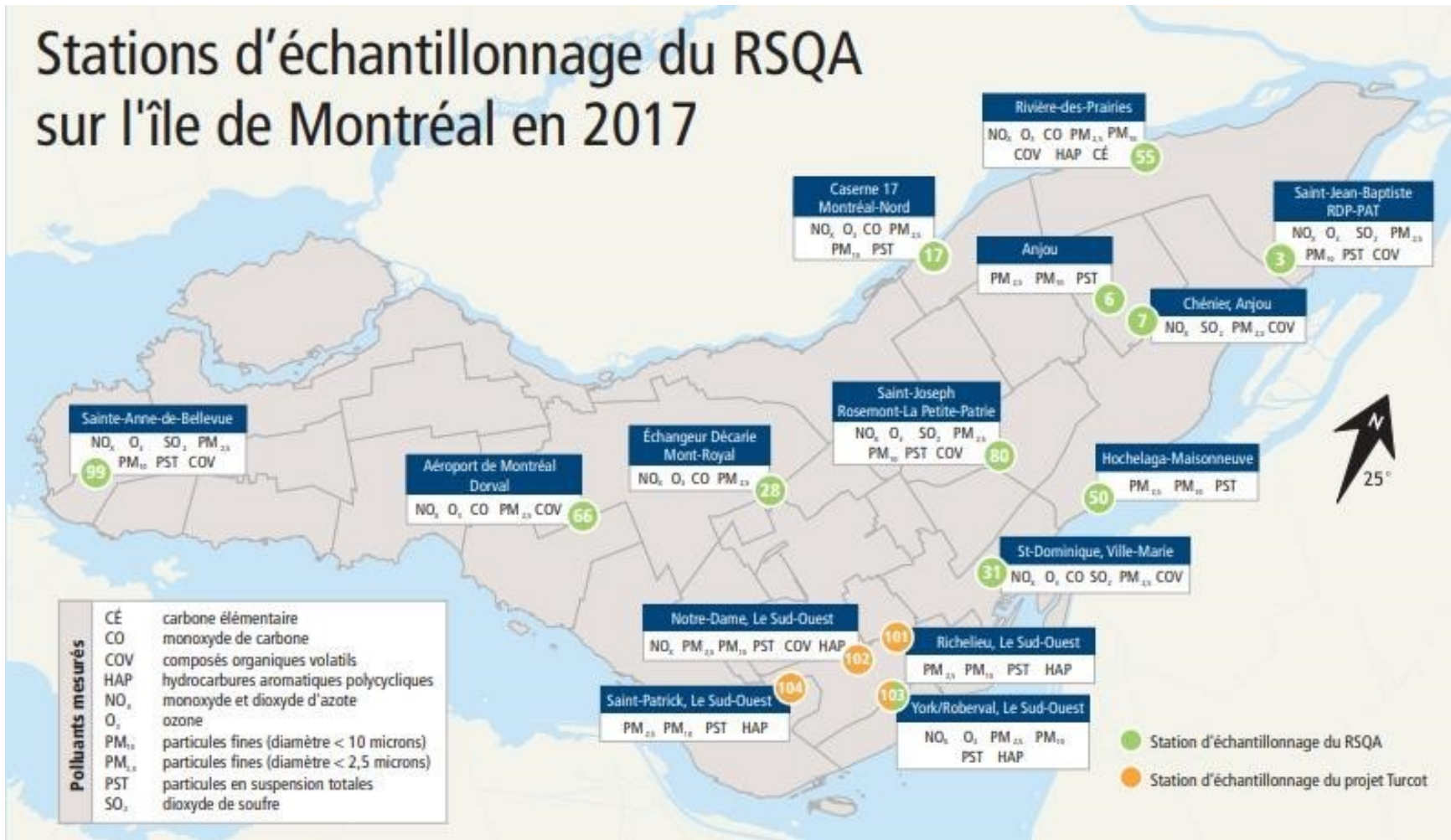


Figure 4-15 Stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air de la ville de Montréal.



## 4.4 Le logiciel AODFinder

Le logiciel pour l'estimation de l'AOD que nous utilisons dans notre recherche a été développé en langage C-Sharp dans le cadre du projet Observatoire spatial urbain par Professeur François Cavayas. Ce logiciel s'appuie sur différentes routines du code atmosphérique 6SV (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum version vecteur ; Vermote *et al.* 1997 ; Kotchenova *et al.* 2008) d'accès libre (<http://6s.ltdri.org/>). Après avoir décrit la formulation du code atmosphérique retenue nous présenterons des détails sur la structure informatique du logiciel.

### 4.4.1 Formulation et hypothèses de base

Le code 6SV fait appel au facteur de réflectance plutôt qu'à la luminance spectrale, la quantité de base qui exprime la mesure du capteur. Ce facteur est le rapport entre la luminance de la cible réelle à celle d'une cible idéale lambertienne de réflectance égale à 1, éclairée et observée sous les mêmes conditions que la cible réelle. Dans le cas du code cette surface idéale est placée au sommet de l'atmosphère et sa luminance est donnée par l'équation suivante (voir désormais Tableau 4.3 pour l'explication des différents symboles) :

$$L_{LAMB}^*[\lambda] = \frac{1}{\pi} E_0[\lambda] * \left(\frac{d}{d_o}\right)^2 \cos \theta_s \quad (5.1)$$

Ainsi la réflectance apparente entrant dans les calculs du code est exprimée comme suit :

$$\rho^*[\lambda] = \frac{L^*[\lambda]}{L_{LAMB}^*[\lambda]} \quad (5.2)$$

Vermote et al. (1997) émettent l'hypothèse que transmittance gazeuse et diffusion atmosphérique sont des phénomènes indépendants. Il est possible cependant de tenir compte de l'impact de la vapeur d'eau sur la diffusion des aérosols puisque vapeur d'eau et aérosols sont concentrés tous deux à la basse atmosphère. Dans notre cas nous avons supposé que transmittance gazeuse et diffusion atmosphérique sont des phénomènes



complètement indépendants. Pour simuler le signal au niveau du capteur aéroporté ou satellital il nous faut le type de réflexion de la surface. Le code 6S propose trois options : 1) une surface lambertienne s'étendant à l'infini ; b) une surface lambertienne finie entourée d'une surface lambertienne avec une réflectance différente de celle visée par le capteur et 3) une surface non-lambertienne s'étendant à l'infini. L'hypothèse d'une surface lambertienne infinie rend beaucoup moins complexe la formulation du transfert radiatif et il a été retenu à cette phase d'analyse.

Compte tenu de ces deux hypothèses (Independence transmittance gazeuse/diffusion, surface lambertienne s'étendant à l'infini) nous pouvons écrire le facteur de réflectance au niveau du capteur à une longueur d'onde comme suit (en omettant l'indication sur la longueur d'onde pour simplifier la formulation) :

$$\rho^* = T_{gaz} * \left( \rho_{R+A} + T_{\downarrow} T_{\uparrow} \frac{\rho}{1 - s \rho} \right) \quad (5.3)$$

Tableau 4-3 Liste des symboles

Symbole	Définition
$\frac{d}{d_o}$	Distance Relative Terre-Soleil en unités astronomiques
$E_0$	Éclairement solaire exo-atmosphériques
$h_T$	Altitude du terrain
$h_P$	Altitude de vol
$L^*$	Luminance au niveau du capteur
$L_{LAMB}^*$	Luminance d'une surface lambertienne au niveau du capteur
$s$	Albédo sphérique
$se$	Sensibilité spectrale par bande spectrale
$T_{gaz}$	Transmittance gazeuse totale (trajet descendant et ascendant du rayonnement)
$T_{\downarrow}$	Transmittance de diffusion totale (directe et diffuse) trajet descendant
$T_{\uparrow}$	Transmittance de diffusion totale (directe et diffuse) trajet ascendant
$\delta_{550}$	Profondeur optique de l'aérosol à 550 nm
$\theta_s$	Angle zénithal du soleil
$\phi_s$	Angle azimutal du soleil
$\theta_v$	Angle zénithal de visée
$\phi_v$	Angle azimutal de visée
$\lambda$	Longueur d'onde
$\lambda_{central}$	Longueur d'onde centrale d'une bande spectrale quelconque
$\lambda_o$	Une des 20 longueurs d'onde standard de calcul des paramètres de diffusion atmosphériques
$\rho$	Réflectance au sol
$\rho^*$	Réflectance au niveau du capteur

$\rho_{R+A}$	Réflectance atmosphérique mixte des aérosols et des molécules de gaz(Rayleigh)
--------------	--

#### 4.4.2 Structure informatique

La figure 4.16 montre sous forme d'organigramme le modus operandi du logiciel AODFinder. Le logiciel comporte trois parties : a) l'extraction des données de l'image analysée et de ses métadonnées ainsi que de la base de données sur les cibles obscures ; b) la génération des LUT via le code atmosphérique ; et 3) l'inférence de l'AOD à 550nm. Pour les trois parties des routines informatiques ont été développées et regroupées dans des bibliothèques de fonctions (Dynamic Link Library-DLL). Ces trois parties sont décrites par la suite.

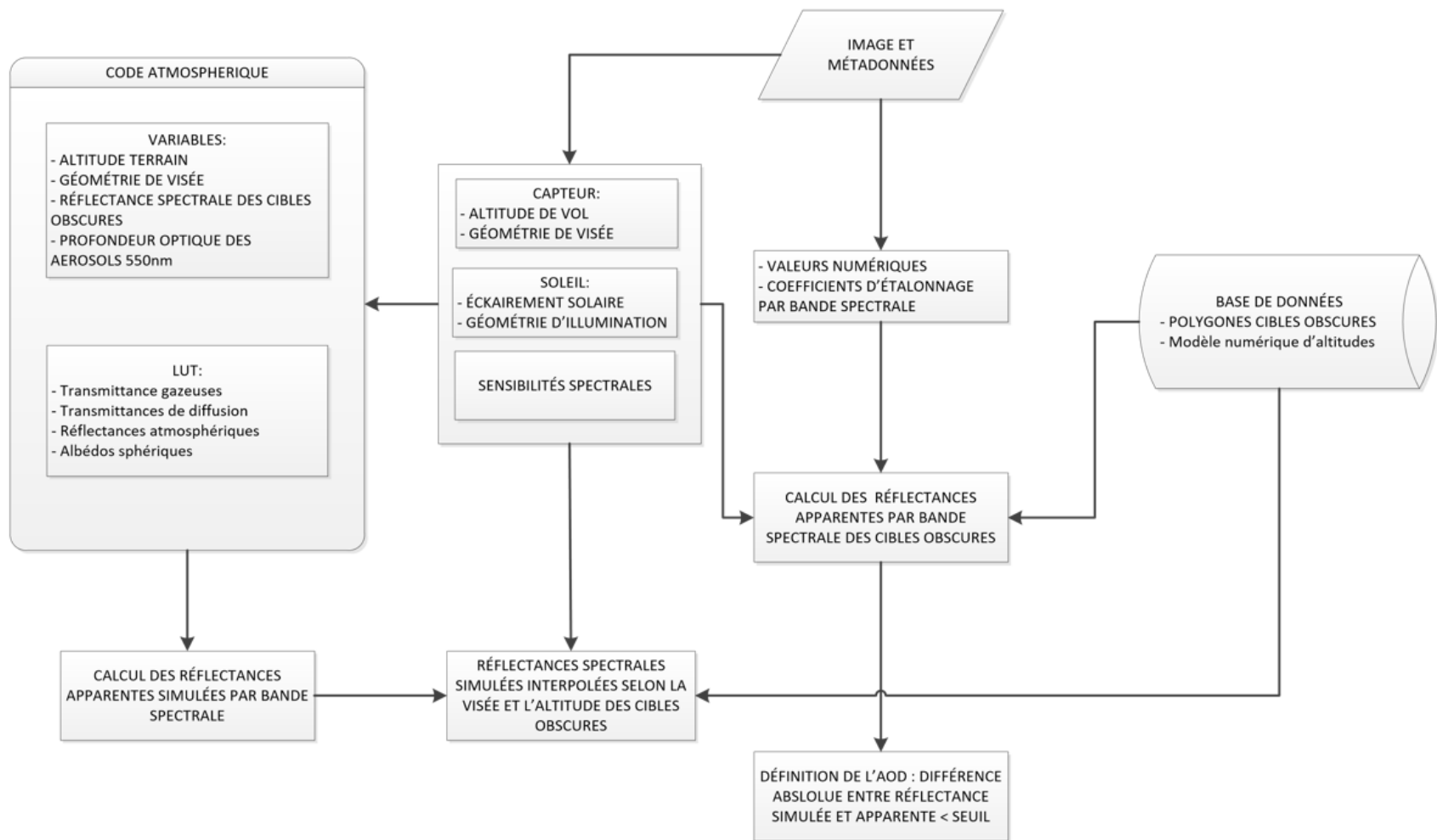


Figure 4-16 Procédure du logiciel AODfinder pour l'estimation de l'AOD à partir de l'imagerie de résolution spatiale moyenne à haute.

## Partie 1 : Images et données sur les cibles obscures

L'extraction des données sur les cibles obscures se fait en appelant des routines groupées dans les bibliothèques suivantes : **READIM**, **METADATA**, **SPECSSENS**, **SUN**, **DRKTRG**. Des détails sur ces bibliothèques sont donnés par la suite.

### **READIM**

Les routines dans cette bibliothèque sont spécialement conçues pour la lecture de l'entête et des canaux d'images des fichiers raster de GEOMATICA (format \*.pix). Dans le cas des images CASI il y a aussi la lecture des images des angles zénithal et azimutal ainsi que du MNA accompagnant les images (voir par ex. figure 4.11). Dans le cas des images satellites, il y a aussi lecture du MNA de la région

### **METADATA**

Pour les capteurs satellitaires, tels que ETM+ de Landsat-7 ou OLI de Landsat-8 utilisées dans cette étude, on lit le fichier des métadonnées accompagnant les images et on extrait les paramètres d'intérêt comme : a) les coordonnées latitude et longitude du centre de l'image ; b) la date et l'heure d'acquisition ; c) la géométrie d'acquisition (position du soleil et du capteur) ; d) les facteurs de conversion des valeurs numériques en luminances. Pour CASI les paramètres de vol des missions de 2012 et 2016 fournis par ITRES (altitude de vol, orientation des lignes de vol, date et heure d'acquisition, coordonnées géographiques du centre des lignes de vol) sont introduits dans des routines spécifiques de la DLL.

### **SPECSSENS**

Le spectre couvert par le code 6SV va de 0.250  $\mu\text{m}$  à 4  $\mu\text{m}$  avec une résolution spectrale de 0.0025  $\mu\text{m}$ . La sensibilité spectrale d'un capteur est nécessaire pour le calcul des paramètres recherchés par bande spectrale (transmittances, éclaircissement solaire, diffusion, etc.). Les courbes de sensibilité par bande spectrale publiées par les fournisseurs d'images (ex. Landsat, Digital Globe) sont introduites dans des routines spécifiques de la DLL. Pour les capteurs hyperspectraux, comme CASI, dont on connaît la longueur d'onde centrale par bande ainsi que le FWHM (Full Width at Half Maximum ; 50%) on suppose une sensibilité spectrale de forme gaussienne centrée à la longueur d'onde centrale de chaque bande (Figure 4.17). On peut alors calculer l'écart-type,  $\sigma$ , en se servant de la relation :

$$FWHM = 2\sqrt{2 \ln(2)} \sigma \approx 2.355 \sigma$$

et par la suite calculer la sensibilité spectrale pour les différentes longueurs d'onde,  $\lambda$ , avec la résolution spectrale utilisée par 6SV de  $0.0025 \mu\text{m}$  :

$$S(\lambda) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\sigma^2}\right)$$

Où  $\lambda_0$  est la longueur d'onde centrale par bande.

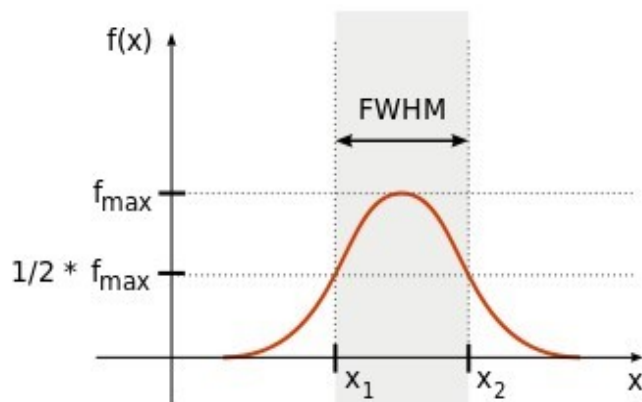


Figure 4-17 Sensibilité spectrale d'une bande CASI.

## SUN

Le code 6SV contient des données sur le rayonnement solaire exo-atmosphérique par longueur d'onde qui ont été intégrées dans le DLL. Les sous-routines utilisées par le code pour le calcul de la position du soleil (angles zénithal et azimutal) ainsi que de la distance Terre-Soleil (unités astronomiques) ont été remplacées par des routines offrant une plus grande précision des calculs tirés de Reda et Andreas (2008). Ces nouvelles routines sont utilisées dans le cas des images aéroportées. Pour les images satellites la position du soleil se trouve dans le fichier des métadonnées. À part les images de Landsat-8 aucun fichier avec les métadonnées ne mentionne la distance Terre-Soleil, nécessaire au calcul de la réflectance apparente.

## **DRKTRGT**

Les routines dans cette bibliothèque servent à : 1) la lecture du fichier image avec les polygones des cibles obscures en format matriciel ; 2) Les bandes spectrales d'intérêt pour l'estimation de l'AOD par capteur ; et 3) la moyenne par bande spectrale d'intérêt des valeurs numériques des pixels de l'image, des altitudes ainsi de la géométrie de visée (cas aéroportée) par polygone des cibles obscures. Il est à noter que seuls les polygones ayant un nombre minimum des pixels (par ex. 10 pixels) et une compacité supérieure à un seuil (par ex. > 0.25) sont retenus pour l'estimation de l'AOD. La compacité,  $C$ , est calculée par la formule suivante :

$$C = \frac{P^2}{4\pi * A}$$

Avec  $P$  le périmètre et  $A$  l'aire d'un polygone. Le critère de la taille d'un polygone permet le calcul des moyennes par bande spectrale plus représentatives des luminances des cibles obscures. Le deuxième critère vise à éviter les calculs avec des polygones d'une forte élongation qui sont plus sensibles à la réflectance de leur voisinage particulièrement en milieu urbain où certaines cibles sont entourées souvent des matériaux brillantes dans les bandes du bleu et du rouge (par exemple, les surfaces cimentées).

### 4.4.2.1 Partie 2 : Génération des LUT

La génération des LUT se fait en appelant des routines provenant du code atmosphérique 6SV groupées dans les bibliothèques suivantes : **ATMO\_PROP**, **AERO\_PROP**, **TR\_GAS**, **SCATTER**. Des détails sur ces bibliothèques sont donnés par la suite.

## **ATMO\_PROP**

Les profils atmosphériques de pression et de température sont nécessaires pour le calcul des transmittances gazeuses ainsi que de la diffusion de Rayleigh. Dans le code 6SV l'atmosphère est divisée verticalement en 34 couches. Pour chaque couche sont données la température, la pression, le contenu en ozone ainsi qu'en vapeur d'eau. Des profils tirés des modèles par défaut (ex. latitudes moyennes en été) sont offerts par 6SV. Ces profils ont été introduits dans le DLL. Il est à noter que les valeurs d'ozone et de la vapeur d'eau peuvent être ajustées pour tenir compte des données externes comme des tables

climatologiques pour l'ozone ou des calculs empiriques selon les paramètres météorologiques mesurés au niveau du sol et éventuellement au niveau du capteur.

## **AERO\_PROP**

Les propriétés des aérosols sont la base pour le calcul de leur diffusion et absorption. Le code 6SV offre une série des modèles d'aérosols par défaut incluant différents pourcentages de poussières, particules solubles à l'eau, sels marins et suie. Ces pourcentages expriment des conditions observées fréquemment en milieu rural (modèle continental) ou urbain ou côtier marin, Nous pouvons aussi définir d'une façon personnalisée ces pourcentages. Pour chaque type d'aérosol il y a calcul des propriétés de diffusion et d'absorption et 6SV propose une méthode de mélange de ces propriétés en pondérant selon le pourcentage de chaque type d'aérosol. Particulièrement pour la fonction de phase de diffusion 6SV introduit la polarisation. Tous ces détails et méthodes ont été intégrées dans le DLL.

Une fois le modèle atmosphérique et le modèle d'aérosol définis, le programme fixe la position du soleil et l'altitude de vol correspondants à l'image analysée et fait varier les paramètres suivants : a) Altitude du terrain ; b) Géométrie de visée (angle zénithal et azimutal) dans le cas aéroporté ; c) Réflectance des cibles obscures ; et d) profondeur optique des aérosols à 550 nm. Les tableaux 4.4 et 4.5 présentent les valeurs utilisées par paramètre dans le cas de CASI et de Landsat respectivement. Quelques explications sur les valeurs choisies s'imposent.

- 1) Altitudes : Les images CASI ne couvrent que l'île de Montréal où l'altitude du terrain ne dépasse pas les 300 m (Mont Royal). Landsat couvre une plus grande région incluant les montagnes des Laurentides dont l'altitude peut atteindre les 900 mètres.
- 2) Visée : Les paramètres de visée (angles zénithal et azimutal) sont variables uniquement pour les images CASI, Landsat est supposé viser au nadir. Les valeurs indiquées au tableau 4.4 tiennent compte de la géométrie de visée dans les missions CASI de 2012 et 2016.
- 3) Réflectance de la forêt dense : Des tests préliminaires avec des réflectances des feuillues et des conifères trouvées dans des bibliothèques de réflectance à accès libre comme celle d'ASTER aboutissaient à des réflectances apparentes simulées



systématiquement plus élevées que les réflectances observées dans les bandes du bleu et du rouge de CASI. Ainsi nous avons décidé de suivre la suggestion de Zagolski et Gastellu-Etcheveroy (1995) et faire des simulations en faisant varier la réflectance des cibles obscures tel qu'indiqué dans les tableaux 4.4 et 4.5.

- 4) AOD 550 : 6SV utilise l'AOD 550 et le coefficient d'extinction de l'aérosol à une longueur d'onde quelconque pour calculer le AOD à cette longueur d'onde. Les valeurs indiquées tiennent compte des évaluations préliminaires (CIMEL pour 2012, visibilité pour 2016, voir chapitre 5) de la profondeur optique des aérosols à 550 nm.

*Tableau 4-4 Paramètres pour la création des LUT dans le cas des images CASI*

Paramètres	Valeurs
Altitude (km)	0, 0.15, 0.3
Angle de visée (degrés)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30
Azimut de visée (degrés)	Azimuths partie gauche et droite de l'image
Réflectance de la forêt dense	0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035
Profondeur optique des aérosols à 550 nm	0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.150, 0.175, 2.0

*Tableau 4-5 Paramètres pour la création des LUT dans le cas des images Landsat*

Paramètres	Valeurs
Altitude (km)	0, 0.25, 0.5, 0.75, 1
Réflectance de la forêt dense	0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035
Profondeur optique des aérosols à 550 nm	0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.150, 0.175, 2.0

Avec ces paramètres le code 6SV permet le calcul des transmittances gazeuses, les transmittances de diffusion, les réflectances atmosphériques ainsi que les albédos sphériques pour les différentes variables. À la fin de cette opération nous obtenons les réflectances apparentes simulées par bande spectrale et par variable.

### **TR\_GAS**

Des routines de 6SV permettent le calcul de la transmittance des gaz suivants : oxygène, ozone, monoxyde et dioxyde de carbone, oxyde d'azote, méthane, vapeur d'eau pour les trajets ascendants et descendants. Les calculs peuvent se faire par longueur d'onde. Une routine utilise les sensibilités spectrales et l'éclairement solaire pour calculer les transmittances gazeuses par bande spectrale.

### **SCATTER**

Des routines spécifiques de 6SV permettent de calculer par la méthode d'ordres successives de diffusion (Lenoble, 2013) les paramètres liés à la diffusion atmosphérique de l'équation 5.3. L'utilisateur peut introduire la polarisation du rayonnement dans les calculs (version vectorielle de 6SV). Dans notre cas nous avons ignoré la polarisation comme les calculs sont beaucoup plus longues pour construire cas par cas les LUT de diffusion et que les différences dans les calculs de l'intensité du rayonnement rétrodiffusé ne changent pas que des quelques pourcentages comparativement à la version scalaire de 6S (Henderson et Chylek, 2005). 6SV fait les calculs précis des tous les paramètres atmosphériques liés à la diffusion dans 20 longueurs d'onde de 3.5 à 4  $\mu\text{m}$ .

#### 4.4.2.2 Partie 3 : Inférence de l'AOD

Les routines pour l'inférence de l'AOD ont été regroupées dans la bibliothèque **INFERENCEAOD**. Le tableau 4.6 présente la façon de former les LUT en fixant certains paramètres et en faisant varier d'autres. Dans le cas des satellites dont la géométrie de visée est considérée fixe par image les LUT sont formés en faisant varier l'altitude du terrain, et la profondeur optique.

Tableau 4-6 Formation des LUT par bande spectrale (pour les symboles voir tableau 4.3).

Paramètres fixes	$h_P, \theta_s, \phi_s, \lambda_{central}, se$
Transmittances gazeuses (variables)	$h_T, \theta_v,$
Paramètres de diffusion (variables)	$h_T, \theta_v, \phi_v, \delta_{550}, \lambda^o$
Autres paramètres de simulation des réflectances apparentes	$\rho$

Pour simuler les réflectances apparentes on interpole (interpolation bilinéaire) dans un premier temps entre les valeurs des LUT des transmittances gazeuses. Ici on fixe la bande spectrale, l'angle zénithal de visée ainsi que l'altitude de la cible obscure. Par la suite on interpole entre les valeurs des LUT des paramètres de diffusion de l'équation 5.3. Ici on fixe la longueur d'onde centrale par rapport au 20 longueurs d'onde standards de 6SV, l'altitude de la cible obscure ainsi que la géométrie de visée et on fait varier la réflectance de la cible et l'AOD à 550 nm.



## 5 Application et résultats

Ce chapitre présente les résultats des analyses de nos données. La section 5.1 donne des détails sur les résultats de validation du logiciel AODFinder avec les images de 2012 tandis que la section 5.2 présente les résultats obtenus avec les images de 2016. Finalement, la section 5.3 fait état des analyses entre AOD et  $PM_{2.5}$ .

### 5.1 Validation

Pour valider les résultats du logiciel nous avons besoin d'estimer l'AOD à 550nm à partir des mesures du AOD à six longueurs d'onde par CIMEL. Pour ce faire on a établi dans un premier temps une relation empirique entre AOD spectral et longueur d'onde pour ensuite estimer l'AOD à 550nm. De plus dans le cas des observations aéroportées il faut estimer le AOD 550 entre le sol et le capteur. Pour cela nous avons utilisé la formule suivante :

$$\delta_a = \delta_{TOT}(1 - e^{-z/h}) \quad (5.1)$$

Où,  $\delta_a$  est l'AOD recherché,  $\delta_{TOT}$  est l'AOD total estimé par CIMEL,  $z$  est l'altitude de vol par rapport à la surface du sol et  $h$  est la hauteur échelle (scale height).

#### 5.1.1 Estimation de l'AOD 550 par les mesure CIMEL

Les figures 5.1 à 5.3 présentent les relations empiriques établi entre les AOD CIMEL et la longueur d'onde pour les mesures au moment de passage du CASI et de Landsat-7. Plus spécifiquement :

1. La figure 5.1 montre la relation établie pour le premier passage du capteur CASI qui a été effectué le 2 septembre 2012 à environ 14h27' heure locale. Selon cette relation nous pouvons estimer un AOD total à 550nm de 0.0697. L'application de l'équation 5.1, tenant compte de l'altitude de vol de 2.1 km et en supposant une hauteur échelle de 2 km, nous aurons un AOD entre sol et avion de 0.04531.

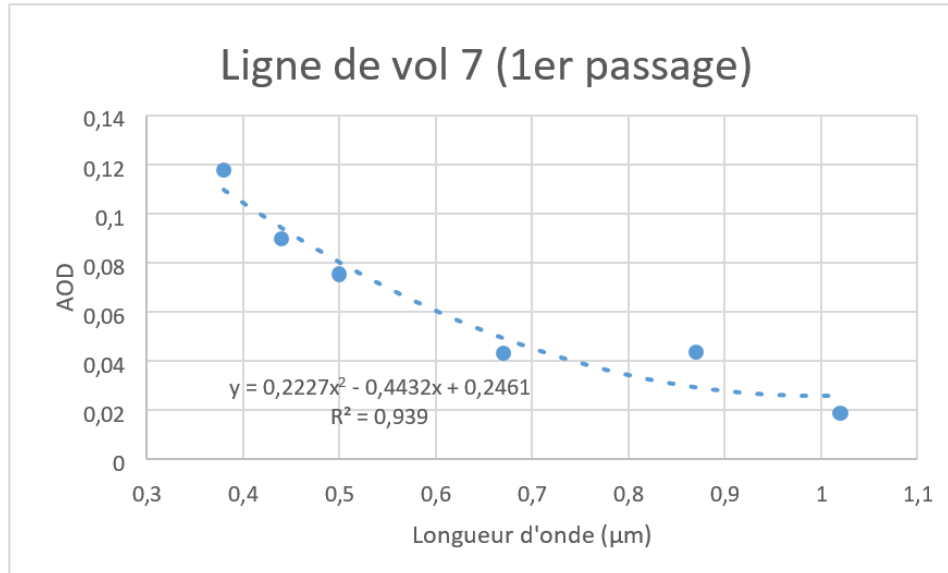


Figure 5-1 Régression polynomiale de deuxième degré entre CIMEL AOD et longueur d'onde.

- La figure 5.2 montre la relation établie pour le deuxième passage du capteur CASI qui a été effectué le 2 septembre 2012 à environ 16h08' heure locale. En suivant la même procédure qu'au point 1 nous avons établi un AOD total à 550 nm de 0.0768 et un AOD entre avion et sol de 0.0499.

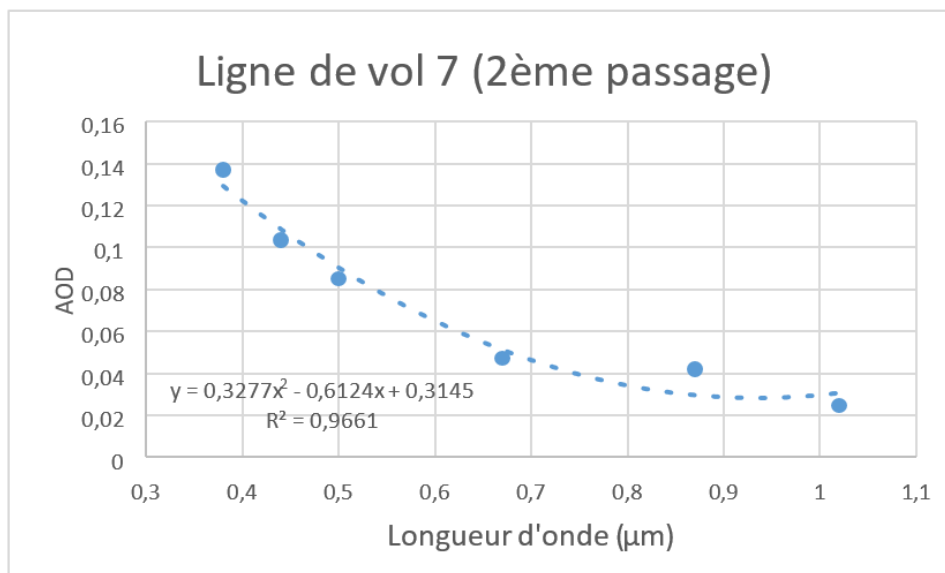


Figure 5-2 Régression polynomiale de deuxième degré entre CIMEL AOD et longueur d'onde.

3. La figure 5.3 montre la relation établie lors du passage de Landsat-7 effectué le 1<sup>er</sup> septembre 2012 à 11h39 heure locale. Selon cette équation nous pouvons estimer un AOD total à 550 nm de 0.0642.

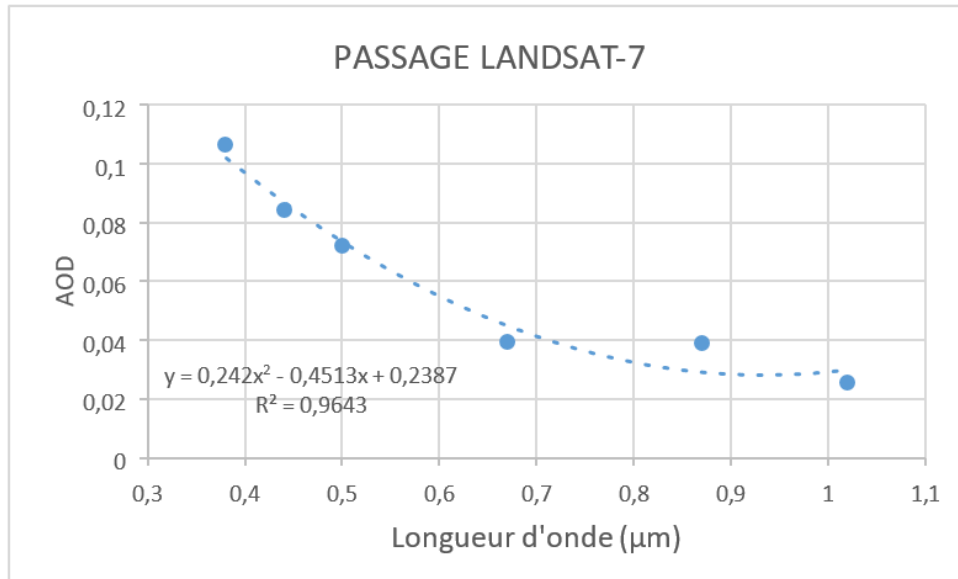


Figure 5-3 Régression polynomiale de deuxième degré entre CIMEL AOD et longueur d'onde.

### 5.1.2 Estimations CASI

Parmi les 19 bandes spectrales (10 dans le bleu et 9 dans le rouge) nous avons retenu par polygone de cible obscure seulement celles où la différence absolue entre valeur simulée et valeur observée de réflectance apparente était inférieure à 0.0005. Les tableaux 5.1 et 5.2 donnent des exemples des résultats obtenus avec une bande spectrale dans le bleu et une autre dans le rouge pour les deux passages de l'avion. L'exemple du tableau 5.1 est tiré des polygones qui se trouvent dans la partie ouest (West) de l'image tandis que celui du tableau 5.2, de la partie est (East). À la lumière des résultats obtenus pour l'ensemble des polygones examinés nous pouvons faire les remarques suivantes :

- 1) Les AOD 550nm entre sol et avion estimés à partir des 19 bandes spectrales et pour les deux passages peuvent différer d'une bande à l'autre. En règle générale, la moyenne des AOD estimés à partir des images CASI se situent aux alentours de 1.25.

2) Il y a des polygones où la moyenne des AOD est proche de l'AOD estimé par les données de CIMEL de 0.045 comme dans le cas d'exemple du tableau 5.1.

Tableau 5-1 Résultats obtenus par AODFinder pour le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> passage de CASI 2012 : cibles obscures dans la partie ouest des images

		Polygone 13 (11230 pixels)		Polygone 9 (11225 pixels)	
		CASI		CASI	
		Ligne 7-1 (2-09-2012)		Ligne 7-2 (2-09-2012)	
		Visée :12.23; 283.5  Altitude : 81 m	Soleil : 42.76; 214.5	Visée :12.283; 283.5  Altitude 82 m	
<b>Bleu</b>	$\lambda_{centrale}$	0.418		0.418	
	<b>AOD(550)</b>	<b>0.1</b>		<b>0.05</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0364		0.0324
	$\rho_{sol}$	0.01		0.01	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.0365		0.0324	
	$\rho_{atm}$	0.0297		0.0317	
<b>Rouge</b>	$\lambda_{centrale}$	0.646		0.636	
	<b>AOD(550)</b>	<b>0.025</b>		<b>0.025</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0288		0.0254
	$\rho_{sol}$	0.025		0.02	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.0289		0.0254	
	$\rho_{atm}$	0.0055		0.0070	



Tableau 5-2 Résultats obtenus par AODFinder pour le 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> passage de CASI 2012 : cibles obscures dans la partie est des images

		Polygone 7 (9991 pixels)		Polygone 4 (10865 pixels)	
		CASI Ligne 7-1 (2-09-2012)		CASI Ligne 7-2 (2-09-2012)	
		Visée :13.49; 103.5 Altitude : 100 m	Soleil : 42.76; 214.5	Visée :14.15; 103.5 Altitude 152 m	Soleil : 56.0; 242.5
<b>Bleu</b>	$\lambda_{centrale}$	0.418		0.418	
	AOD(550)	<b>0.125</b>		<b>0.125</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0379		0.0414
	$\rho_{sol}$	0.015		0.02	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.0377		0.0414	
	$\rho_{atm}$	0.0280		0.0295	
<b>Rouge</b>	$\lambda_{centrale}$	0.636		0.617	
	AOD(550)	<b>0.100</b>		<b>0.100</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0289		0.0340
	$\rho_{sol}$	0.025		0.03	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.0289		0.0340	
	$\rho_{atm}$	0.0074		0.0093	

### 5.1.3 Estimations LANDSAT-7

Les AOD 550nm estimés à partir des cibles obscures pour les bandes spectrales du bleu et du rouge de Landsat-7 étaient moins variables que dans le cas des images CASI. Le tableau 5.3 montre les résultats obtenus par deux polygones de cibles obscures un a une altitude de 70 mètres et l'autre à 582 mètres. La moyenne des AOD établies pour le polygone à 70 m

est effectivement proche de la valeur estimée à partir de CIMEL de 0.0642. Si on tient compte de l'altitude de 582 m et des AOD estimés pour les bandes bleue et rouge on peut inverser l'équation 5.1 pour obtenir le AOD total à partir du niveau de la mer. Ainsi on obtiendra un AOD de l'ordre de 0.06 et de 0.03 respectivement pour les bandes bleue et rouge.

Tableau 5-3 Résultats de AODFinder avec l'image Landsat-7 dans les bandes bleue et rouge

		Polygone 9356 (27 pixels)		Polygone 13 (26 pixels)	
		Altitude 70 mètres		Altitude 582 mètres	
		Landsat 7		Landsat 7	
		Visé :Nadir	Soleil : 42 Azimut : 150	Visé :Nadir	Soleil : 42 Azimut : 150
<b>Bande bleue</b>	$\lambda_{centrale}$	0.478		0.478	
	<b>AOD(550)</b>	<b>0.05</b>		<b>0.025</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0814		0.0772
	$\rho_{sol}$	0.01500		0.015	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.08147		0.07702	
	$\rho_{atm}$	0.07015		0.06505	
<b>Bande rouge</b>	$\lambda_{centrale}$	0.661		0.661	
	<b>AOD(550)</b>	<b>0.075</b>		<b>0.01</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.0431		0.0364
	$\rho_{sol}$	0.025		0.02000	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.04310		0.03641	
	$\rho_{atm}$	0.02145		0.01761	

## 5.2 Application

### 5.2.1 Images CASI

Tel que mentionné au chapitre 4, le logiciel a été appliqué à des tuiles qui comprenaient au moins une station de mesure des  $PM_{2.5}$  par date d'acquisition. Huit tuiles ont été ainsi retenues. Les AOD ainsi estimés pouvaient se comparer aux mesures de concentration des microparticules à ces stations (section 5.3). Des mesures en concomitance avec les passages de l'avion ont été prises avec le photomètre MICROTOPS à des fins de validation des résultats. Malheureusement, à cause d'un mauvais fonctionnement de l'appareil, les mesures étaient inutilisables. Ainsi nous avons eu recours à la visibilité mesurée à l'aéroport de Montréal proche des heures de passage de CASI. Le tableau 5.4 montre les calculs selon la routine du code 6SV (ODA550). Pour l'avion nous avons utilisé l'altitude par ligne de vol et l'équation 5.1. Les visibilités montrent que les acquisitions ont été effectuées pendant des jours clairs.

Tableau 5-4 Calculs de l'AOD 550nm à partir de la visibilité mesurée à l'aéroport de Montréal

Date	visibilité	AOD total	AOD avion
03-08-2016	48.3	0.15	0.056
04-08-2016	24.1	0.23	0.083
20-08-2016	48.3	0.15	0.080
23-08-2016	48.3	0.15	0.079
24-08-2016	48.3	0.15	0.078
02-09-2016	48.3	0.15	0.078
03-09-2016	48.3	0.15	0.078

Parmi les 21 bandes spectrales (8 dans le bleu et 13 dans le rouge) nous avons retenu par polygone de cible obscure seulement celles où la différence absolue entre valeur simulée et valeur observée de réflectance apparente était inférieure à 0.0005. La principale remarque que nous pouvons faire est que, comme dans le cas des données CASI 2012, les AOD 550 nm estimés sont souvent différents d'une bande spectrale à l'autre, en ne retenant que les

bandes pour lesquelles la différence absolue entre réflectances apparentes observée et simulée est inférieure à 0.0005. Les tableaux 5.5 à 5.7 montrent des exemples des résultats pour deux bandes dans le bleu et le rouge. En règle générale les moyennes des AOD estimées pour l'ensemble des bandes spectrales dans le bleu et le rouge sont proches des valeurs du tableau 5.3.

Tableau 5-5 Résultat AODFinder pour les images CASI

		AODFinder-CASI	Polygone 2757	AODFinder-CASI	Polygone 455	AODFinder-CASI	Polygone 6484
		Station RSQA 50-80	Tuile CASI 20-08-2016	Station RSQA 99	Tuile CASI 23-08-2016	Station RSQA 28	Tuile CASI 24-08-2016
			Visé : +12 Soleil : 34.4		Visé : +3 Soleil : 34.3		Visé : -5 Soleil : 39
Bleue	$\lambda_{centrale}$	0.446		0.475		0.496	
	AOD(550)	<b>0.01</b>		<b>0.01</b>		<b>0.025</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.03306		0.02842		0.03181
	$\rho_{sol}$	0.03346		0.02870		0.03172	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.02		0.025		0.02500	
	$\rho_{atm}$	0.01641		0.01107		0.00984	
Rouge	$\lambda_{centrale}$	0.660		0.639		0.653	
	AOD(550)	<b>0.06</b>		<b>0.025</b>		<b>0.1</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.3226		0.02765		0.02724
	$\rho_{sol}$	0.03227		0.02743		0.02721	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.02		<b>0.025</b>		0.02500	
	$\rho_{atm}$	0.00501		<b>0.00350</b>		0.00523	

Tableau 5-6 Résultat AODFinder pour les images CASI

		AODFinder-CASI	Polygone	AODFinder-CASI	Polygone 337	AODFinder-CASI	Polygone 4562
		Station RSQA 29	Tuile CASI 02-09-2016	Station RSQA 31	Tuile CASI 20-08-2016	Station RSQA 03	Tuile CASI 03-09-2016
			Visé : +12 Soleil : 34.4		Visé : -22 Soleil : 36.6		Visé : 10; 101 Soleil : 43.5; 145 Altitude : 16 m
Bleue	$\lambda_{centrale}$	0.446	0.03306	0.496	0.02735	0.468	0.0315
	AOD(550)	0.01		0.075		0.05	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>			0.02735			
	$\rho_{sol}$	0.03346		0.02735		0.0315	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.02		0.02		0.0200	
	$\rho_{atm}$	0.01641		0.01091		0.0153	
Rouge	$\lambda_{centrale}$	0.660	0.3226	0.624	0.01796	0.653	0.0279
	AOD(550)	0.06		0.01		0.1	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>			0.01796			
	$\rho_{sol}$	0.03227		0.01796		0.0278	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.02		0.01500		0.0250	
	$\rho_{atm}$	0.00501		0.00368		0.0061	

Tableau 5-7 Résultat AODFinder pour les images CASI

		AODFinder-CASI	Polygone 633	AODFinder-CASI	Polygone 337
		Station RSQA 55	Tuile CASI 23-08-2016  Visé : -13 Soleil : 34.5	Station RSQA 103	Tuile CASI 04-08-2016  Visé : +6 Soleil : 36.6
Bleue	$\lambda_{centrale}$	0.446		0.453	
	AOD(550)	0.1		0.075	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.04114		0.03355
	$\rho_{sol}$	0.04132		0.03347	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.03000		0.03000	
	$\rho_{atm}$	0.01885		0.00927	
Rouge	$\lambda_{centrale}$	0.667		0.653	
	AOD(550)	0.01		0.01	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.03715		0.03591
	$\rho_{sol}$	0.03721		0.03573	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.03500		0.03500	
	$\rho_{atm}$	0.00351		0.00198	

### 5.1.1 Image LANDSAT-8

Contrairement à l'image Landsat-7 de 2012 et les images CASI, il était difficile d'obtenir pour toutes les trois bandes examinées (bleue côtière, bleue et rouge) des résultats en mettant comme seuil de différence absolue entre réflectance apparente simulée et observée les 0.0005. Ce n'est qu'avec un seuil de 0.05 que nous avons obtenu des résultats pour un grand nombre de polygones de cibles obscures et toutes les trois bandes. Le tableau 5.9 présente des exemples obtenues proche de trois stations RSQA. Les moyennes des AOD établis par le logiciel sont proches de valeurs calculées à l'aide de la visibilité pour le 3 août (tableau 5.4).



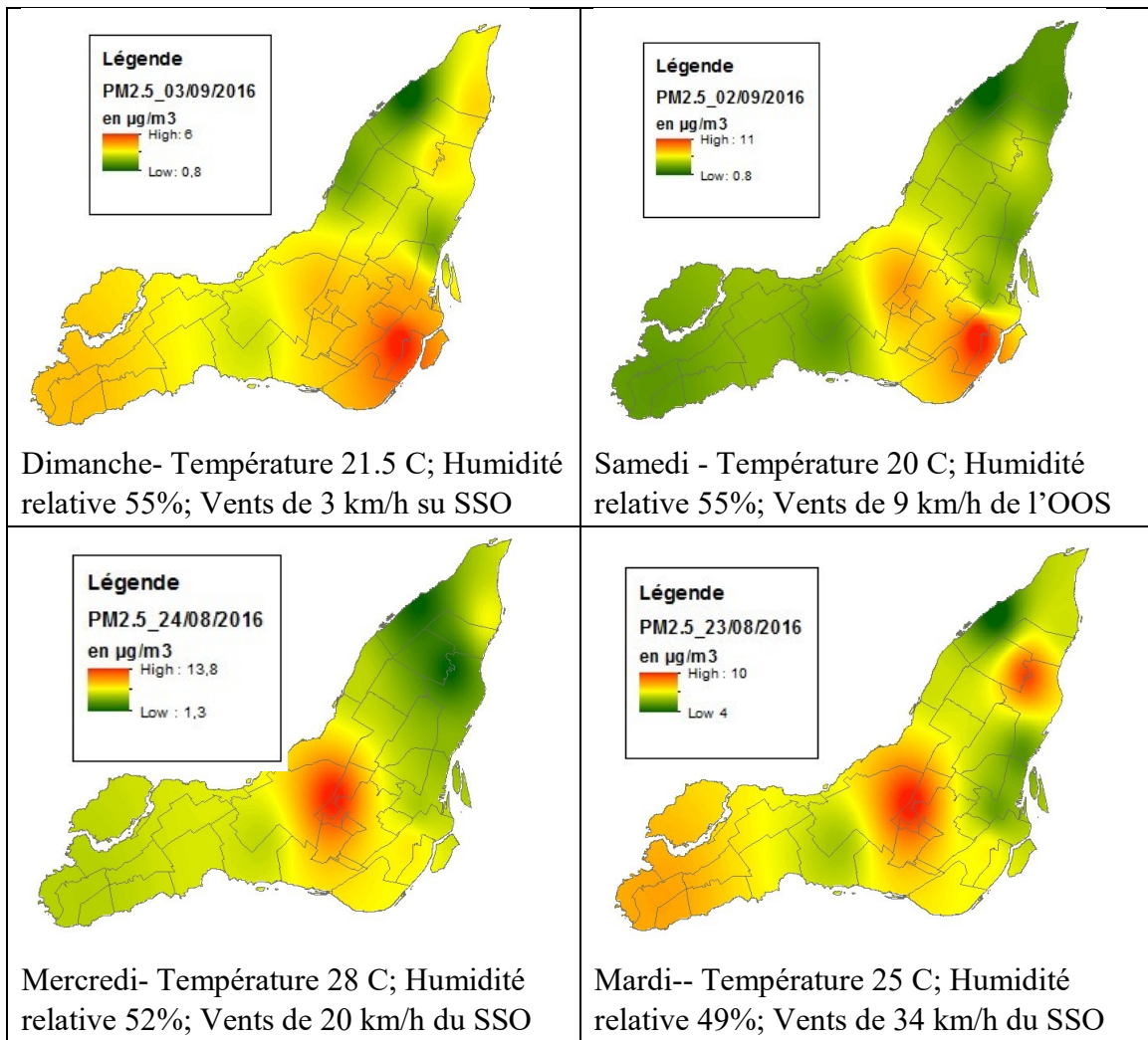
Tableau 5-8 Résultats AODFinderSAT pour les images Landsat-8 dans les bandes bleues côtière, bleue et rouge

		AODFinder-Sat	Polygone 1431	AODFinder-Sat	Polygone 337	AODFinder-Sat	Polygone 4562
		Station RSQA 03	Landsat 8	Station RSQA 99	Landsat 8	Station RSQA 28	Landsat 8
			Visé : +12 Soleil : 34.4		Visé : -22 Soleil : 36.6		Visé : +10 Soleil : 34.5
Bande bleue côtière	$\lambda_{centrale}$	0.443		0.443		0.443	
	AOD(550)	1.25		0.1		1.5	
	$\rho_{app}^{observée}$		0.11656		0.10991		0.11856
	$\rho_{sol}$	0.11639		0.10913		0.11821	
	$\rho_{app}^{simulée}$	0.01000		0.025		0.03500	
	$\rho_{atm}$	0.11574		0.09287		0.11684	
Bande bleue	$\lambda_{centrale}$	0.482		0.482		0.482	
	AOD(550)	1.0		0.01		1.5	
	$\rho_{app}^{observée}$		0.09399		0.08575		0.09653
	$\rho_{sol}$	0.09360		0.08581		0.05739	

	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	0.01000		0.02500		0.01000	
	$\rho_{atm}$	0.09290		0.06810		0.05586	
<b>Bande rouge</b>	$\lambda_{centrale}$	0.654		<b>so</b>		<b>0.653</b>	
	AOD(550)	<b>1.25</b>		<b>so</b>		<b>1.5</b>	
	$\rho_{app}$ <i>observée</i>		0.05254		<b>so</b>		0.05783
	$\rho_{sol}$	0.05220		<b>so</b>		0.05739	
	$\rho_{app}$ <i>simulée</i>	<b>0.001</b>		<b>So</b>		0.01000	
	$\rho_{atm}$	0.05200		<b>so</b>		0.05586	

## 5.2 Analyse de la relation AOD- PM<sub>2.5</sub>

La figure 5.4 montre des cartes de concentrations des PM<sub>2.5</sub> mesurées à 14h00 heure locale créées par krigeage des valeurs aux huit stations de mesure RSQA (chapitre 4). Les conditions météorologiques (température, humidité relative, et vents) sont aussi indiquées.



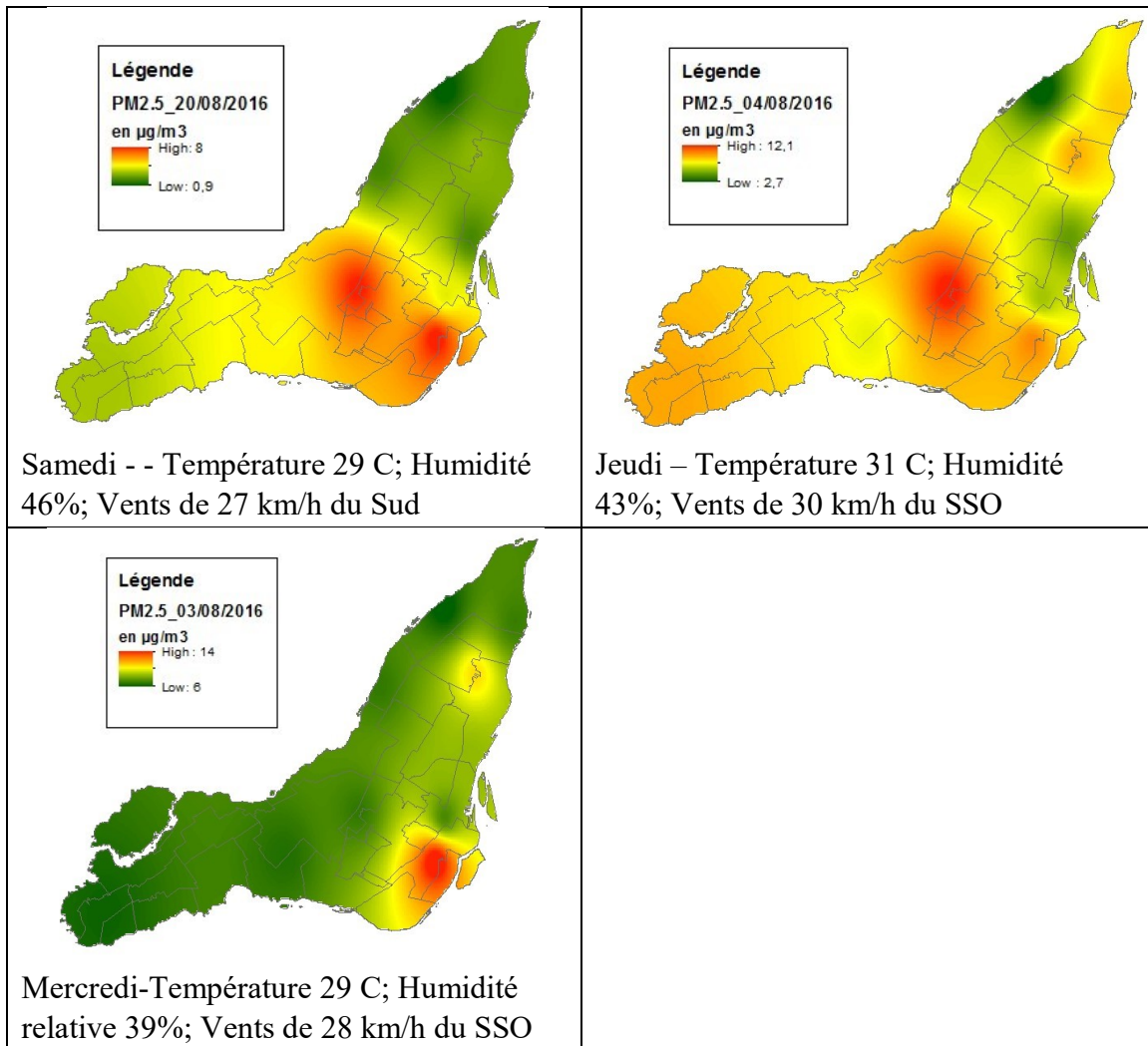


Figure 5-4 Cartes des concentrations de PM2.5 pour les jours d'acquisition des images CASI 2016. Attention : l'échelle des couleurs n'est pas la même pour toutes les cartes.

Le tableau 5.9 montre les valeurs moyennes des AOD 550nm calculées par les tuiles de CASI ainsi que les moyennes journalières des PM<sub>2.5</sub> mesurées aux stations RSQA correspondantes. Nous pouvons constater qu'il n'y a pas de relation statistique qui se dégage de ces valeurs. Une certaine tendance se dégage lorsqu'on introduit les valeurs mesurées de PM<sub>2.5</sub> au moment du passage de l'avion. (Figure 5.5)

Tableau 5-9 Moyenne des AOD a 550nm pour chaque station RSQA associés avec les mesures journalières des PM<sub>2.5</sub> CASI-2016

Moyenne des AOD-550 images CASI-2016						
Stations	50-80	99	28	31	3	55
AOD-550	0.04	0.02	0.06	0.04	0.08	0.06
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	6	3	9.7	7.1	6.4	1.4

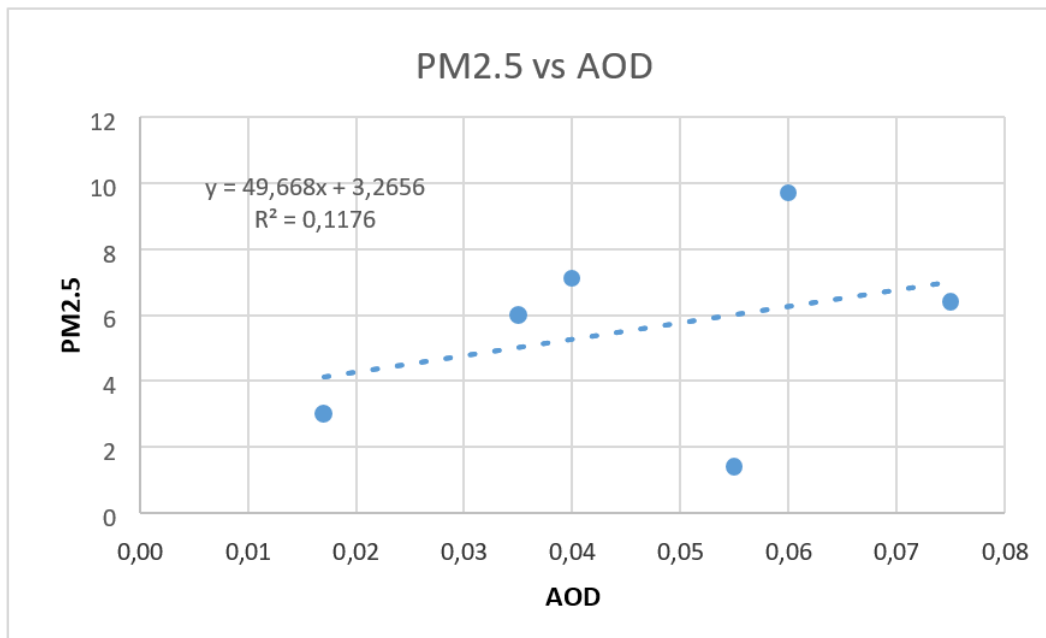


Figure5-5 Relation entre PM<sub>2.5</sub> mesuré lors du passage de l'avion et AOD moyen estimé par les données CASI

Il était difficile de localiser à la résolution de 30x30 mètres de Landsat-8 des polygones de végétation dense proches des stations RSQA. Nous avons pu trouver six polygones proche de trois stations. Le tableau 5.10 montre les valeurs moyennes des AOD des trois bandes

Landsat-8 et les PM<sub>2.5</sub> des stations correspondant. Comme on peut l'observer il n'y a pas une relation claire entre les AOD estimé vs PM<sub>2.5</sub> mesuré lors du passage du satellites Landsat-8.

Tableau 5-10 Moyenne des AOD a 550nm pour chaque station RSQA associés avec les mesures journalières des PM<sub>2.5</sub> Landsat-8

Moyenne des AOD-550 image Landsat-8						
Stations	50-80	99	28	31	3	55
AOD-550	1.20	1.00	1.4	1.20	0.50	0.50
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	16	10.5	17	17	16.5	15



## 6 Discussion et conclusions

Dans notre recherche nous avons appliqué le logiciel AODFinder pour estimer les AOD 550 nm à partir des images à résolution spatiale moyenne à fine. Comme images à résolution moyenne nous avons considéré des images multispectrale des Landsat-7 et -8. Les images hyperspectrale aéroportées acquises par CASI-1500 en 2012 et 2016 ont servi comme images à haute résolution spatiale.

Dans un premier temps nous avons évalué les AOD estimés à l'aide des données de 2012 en comparaison avec les AOD estimés par le photomètre CIMEL. Nous pouvons constater que les AOD moyens pour les bandes spectrales utilisées dans le bleu et le rouge que ce soit avec le capteur hyperspectral CASI ou le capteur ETM+ de Landsat se comparent avantageusement avec les AOD provenant de CIMEL. Fait intéressant à signaler est que le programme se comporte bien avec des données aéroportées malgré la complexité d'acquisition (angles de visée variables). Tenant compte de ces résultats nous avons introduit dans nos analyses les images hyperspectrales CASI 2016 ainsi qu'une image disponible pour 2016 de Landsat-8. Malheureusement les données cueillies avec le photomètre solaire MICROTOPS en synchronisme avec le passage des capteurs n'étaient pas utilisables pour des raisons techniques. Ainsi nous avons eu recours aux visibilité mesurées à l'aéroport de Montréal afin de valider nos résultats. Le problème majeur rencontré était avec les données de Landsat-8 lorsqu'on se limite à l'île de Montréal. En effet à cette résolution de 30m x 30 m très peu de polygones de forêt dense sont exploitables pour le calcul précis de l'AOD. Dans le cas de CASI il y a suffisamment des polygones de forêt dense et les moyennes des AOD estimés dans les différentes bandes sont proches des valeurs calculées d'après la visibilité.

En règle générale les résultats confirment les observations de Teillet *et al.* (1995) à savoir que le calcul de AOD 550 nm par différentes bandes spectrales peuvent différer d'une bande spectrale à l'autre. Dans le cas de CASI ceci peut s'expliquer par : 1) problèmes dans l'étalonnage du capteur ; et 2) problèmes des effets d'adjacence pour certains petits polygones. Teillet *et al.* proposent la prise d'une moyenne pondérée en fonction de la bande spectrale dans le cas du capteur TM de Landsat. Une autre piste à



explorer pour comprendre ces résultats pourrait être la non-validité de l'hypothèse lambertienne pour certaines bandes spectrales particulièrement dans le rouge où la diffusion atmosphérique est beaucoup moindre que dans les bandes du bleu. Les résultats étaient plus stables dans le cas des données de Landsat.

Une dernière remarque avec les données aéroportées est les corrections géométriques qui sont suivies d'un rééchantillonnage des valeurs numériques des pixels. Ce rééchantillonnage peut altérer les valeurs des pixels d'une façon importante lorsque les déformations géométriques dues à la turbulence atmosphérique lors de l'acquisition des données sont importantes comme le montre la figure 6.1.



*Figure 6-1 Exemples des déformations géométriques des images CASI (mission 2012).*

L'approche de Zagolski et Gastellu-Etchegorry (1995) de simuler les réflectances apparente en faisant varier les réflectances des cibles obscures est intéressante. Le problème avec cette approche est qu'il est parfois difficile de choisir l'AOD car différentes combinaisons réflectance au sol-profondeur optique peuvent aboutir à des réflectances apparentes simulées très proches.

Une fois les valeurs d'AOD estimés pour l'année 2016, nous avons analysé leur relation avec les  $PM_{2.5}$ . Les valeurs d'AOD pour les jours d'acquisition d'images CASI ne dépassaient pas le 1.0 environ. Les  $PM_{2.5}$  (moyennes journalières) étaient généralement bas en deçà de  $10 \mu g/cm^3$ . Il faut aussi noter que le nombre de stations de la RSQA où

les données sur les  $PM_{2.5}$  sont mesurées est insuffisant pour bien juger de la pertinence de l'exercice.

La principale conclusion de cette recherche est que les AOD peuvent être estimés avec une bonne précision à partir des images de résolution moyenne à fine. Le problème avec des images comme Landsat de résolution spatiale de 30 m est qu'il est difficile d'établir des cibles obscures à l'intérieur de l'île de Montréal. Il faut donc explorer d'autres types d'images satellites qui ont des résolutions d'une dizaine de mètres ou plus fines. Des exemples sont les images de Sentinel-2 ou Pléiades. Les images hyperspectrales aéroportées n'ont pas donné des meilleurs résultats par rapport aux images satellites. Compte tenu la complexité d'acquisition des données (déformations géométriques, altérations radiométriques, angles de visées variables pour la même image), le rapport coût/efficacité pour l'estimation de l'AOD est faible. Les avantages des images aéroportées sont que le vol à des altitudes de l'ordre de 2 km rendent les estimations des  $PM_{2.5}$  à partir des AOD entre le sol et l'avion plus fiables. Également avec des résolutions métriques il est possible de localiser beaucoup des cibles obscures même dans des quartiers denses de la ville de Montréal. Notre hypothèse de départ, à savoir, une relation significative entre AOD et  $PM_{2.5}$  n'a pas pu être infirmé ou confirmé.

À la lumière de cette recherche nous pensons qu'une future expérience sur ce sujet doit comprendre un moyen de mesure de l'AOD indépendant des images (p.ex. photomètre CIMEL) à des fins de validation et une longue série d'images satellites de résolution plutôt haute pour avoir suffisamment des polygones des cibles obscures.



## Références

- Ahern F.J., Gauthier R.P., Teillet P.M., Sirois J., Fedosejevs G. & Lorente D. (1991). An Investigation of continental aerosols with high-spectral-resolution solar-extinction measurements. *Applied Optics*, 30(36):5276–5287.
- Ahern F.J., Teillet P.M., & Goodenough D.C. (1979). Transformation of Atmospheric and Solar Illumination Conditions on the CCRS Image Analysis System. *Proc. 1979 Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, West Lafayette, Indiana, pp. 34-52.
- Berglind N., Bellander T., Forastiere F., von Klot S., et al. (2009) Ambient Air Pollution and Daily Mortality Among Survivors of Myocardial Infarction, *Epidemiology*, 20(1): 110-118.
- Bisson M. (1986) Introduction à la pollution atmosphérique. Les Publications du Québec, Québec.
- Boucher O. *et al.* (2013). Clouds and aerosols. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K.
- Bouroubi Y. (2009). *REFLECT : logiciel de restitution des réflectances au sol pour l'amélioration de la qualité de l'information extraite des images satellitaires à haute résolution spatiale*. Thèse de doctorat, Université de Montréal.
- Bouroubi Y., Batita W., Cavayas F., & Tremblay N. (2018). Ground Reflectance Retrieval on Horizontal and Inclined Terrains Using the Software Package REFLECT. *Remote Sensing*, 10: 1638.
- Briottet, X., Foucher, P.-Y., Marion, R., & Deschamps, A. (2013). Caractérisation de panaches industriels par imagerie Hyperspectrale. *Photoniques*, 31-34.
- Chu, Y., & al. (2016). A Review on Predicting Ground PM<sub>2.5</sub> Concentration Using Satellite Aerosol Optical Depth. *Atmosphere*, 7(10): 129, <https://doi.org/10.3390/atmos7100129>.
- Deschamps, A. (2012). *Caractérisation des panaches industriels par imagerie hyperspectrale*. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie, France.
- Engel-Cox, J., Hoff, R., Rogers, R., Dimmick, F., Rush, A., Szykman, J.-S., Zell, E. (2006). Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3dimensional particulate characterization. *Atmospheric Environment*, 40, 80568067.
- Guang, J., Xue, Y., Bai, L., Wan, W., Wang, Y., Li, Y., & Li, X. (2008). An Investigation of Air Pollution in Hong Kong with ASTER data. *IGARSS*. 3, pp. 1362-1365. IEEE.

- Gupta P., Christopher, S. (2009b). Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: 2. A neural network approach. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114(D20):1-14.
- Gupta, P. et Christopher, S.A. (2009a) Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach, *Journal of Geophysical Research*, 114(D14):1-13.
- Gupta, P., & Christopher, S.A. (2008). Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements. *Atmospheric, Chemistry and Physics*, 8, 3311-3324.
- Henderson B., & Chylek P. (2005). The effect of spatial resolution on satellites aerosol optical depth retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9): 1984-1990.
- Hervo, M. (2012). Etude de propriétés optiques et radiatives des aérosols atmosphériques en atmosphère réelle: Impact de l'hygroscopicité. *Thèse: Université Balaise Pascal*.
- Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., & al, e. (2003). Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in The Netherlands. *Lancet*, 360:1203– 1209.
- Hoff R.M., & Christopher S.A. (2009). Remote Sensing of Particulate Pollution from Space: Have We Reached the Promised Land? *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 59:645–675.
- Idrissa Bokoye, Amadou & Royer, Alain & neil, N & Cliche, P & Fedosejevs, G & Teillet, P & Mearthur, L. (2001). Characterization of Atmospheric Aerosols across Canada from a Ground-based Sunphotometer Network: AEROCAN. *Atmosphere-*. 39. 429-456. 10.1080/07055900.2001.9649687.
- Jerrett M., Arain A., Kanaroglou P., Beckerman B., Potoglou D., Sahuvaroglu T., Morrison J. & Giovis C. (2005). A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 15: 185-204.
- Kaufman Y. J., & Sendra C. (1988). Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 9: 13571381.
- Kloog I., Koutrakis P., Coull B.A., Lee H.J., & Schwartz J. (2011) Assessing temporally and spatially resolved PM<sub>2.5</sub> exposures for epidemiological studies using satellite aerosol optical depth measurements, *Atmospheric Environment*, 45: 6267-6275
- Kotchenova S. Y., V. E. (2008). Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study,. *Applied Optics*, 47(13): 2215-2226.
- Lenoble, J., Remer, L., & Tanré, D. (Eds) (2013). *Aerosol Remote Sensing*. Springer, Chichester, UK.

- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., & Schwartz, J. (2012). Chronic Exposure to Fine Particles and Mortality: An Extended Follow-up of the Harvard Six Cities Study from 1974 to 2009. *Environmental Health Perspectives*, 965-970.
- Liu Y., Franklin M., Kahn R., & Koutrakis P. (2007), Using aerosol optical thickness to predict ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations in the St. Louis area: A comparison between MISR and MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 107: 33-44.
- Liu Y., Park R.J., Jacob D.J., Li Q., Kilaru V., & Sarnat J. A. (2004), Mapping annual mean ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations using Multiangle Imaging Spectroradiometer aerosol optical thickness over the contiguous United States, *Journal Geophysical Research-Atmospheres*, 109 (D22)
- Martin R.V. (2006). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42: 7823-7843.
- Pearce J.L., Rathbun S.L., Aguilar-Villalobos M., & Naeher L.P. (2009). Characterizing the spatiotemporal variability of PM<sub>2.5</sub> in Cusco, Peru using kriging with external drift, *Atmospheric Environment* 43 (2009) 2060–2069
- Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds. Cambridge University Press, pp. 571-657, doi:10.1017/CBO9781107415324.016.
- Pope III, A., Lefler J.S., Ezzati M., Higbee J.D., Marshal J.D., Kim S.-Y., Bechle M., Gillat K.S., Vernon S.E., Robinson A.L., & Burnett R.T. (2019) Mortality Risk and Fine Particulate Air Pollution in a Large, Representative Cohort of U.S. Adults, *Environmental Health Perspectives*, 127(7): 077007-1 to -9.
- Reda, I., & Andreas, A. (2008). Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. *National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Laboratory*, NREL/TP-560-34302.
- Remer L.A., Brogniez C., Cairns B., Hsu N.C., Kahn R., Stammes P., Tanré D. & Torres O. (2013). *Recent instruments and algorithms for passive shortwave remote sensing*, Ch. 8 in *Aerosol Remote Sensing*, Lenoble J., Remer L., & Tanré D. (Eds), Springer, Chichester, UK.
- Saleh N.M., Lim H.S., MatJafri M.Z., & Abdullah K. (2007) Air Quality Derivation utilizing Landsat TM image over Penang, Malaysia, *Proc. Recent Advances in Space Technologies, 2007, RAST '07*, 3rd International Conference on Digital Object Identifier, pp: 259 – 263.
- Schuster, Greg & Dubovik, Oleg & Holben, B.N.. (2006). Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *J. Geophys. Res.* 111.
- Seinfeld J.H., & Pandis S.N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics, from Air Pollution to Climate Change*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley, New York.
- Sioris C.E., Abboud, I., Fioletov, V.E., & McLinden, C. A. (2017). AEROCAN, the Canadian sun-network of AERONET: Aerosol monitoring and air quality applications. *Atmospheric Environment*, 167(2017): 444-457.

- Teillet, P., & Fedosejevs, G. (1995). On the Dark Target Approach to Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(4): 374-387.
- Thomas C., Doz S., Briottet X., Santer R., Boldo D., & Mathieu S. (2009). Remote sensing of aerosols in urban areas: Sun/shadow retrieval procedure from airborne very high spatial resolution images, *2009 Joint Urban Remote Sensing Event, IEEE Publisher*, DOI: 10.1109/URS.2009.5137486
- Tonne C. *et al.* (2007). A Case-Control Analysis of Exposure to Traffic and Acute Myocardial Infarction, *Environmental Health Perspectives*, 115(1): 53-57.
- Tulloch M., & Li J. (2004). Applications of Satellite Remote Sensing to Urban Air-Quality Monitoring: Status and Potential Solutions to Canada, *Environmental Informatics Archives*, 2: 846-854
- van Donkelaar A., Martin R.V., & Park R.J. (2006). Estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> using determined from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical research Atmospheres*, 111, D21201, doi.org/10.1029/2005JD006996.
- Vermote E.F., T. D.-J. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S. *An Overview*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 675-686.
- von Klot S., Gryparis A., Tonne C., Yanosky J., Coull B., Goldberg R., Lessard D., Melly S.J., Suh H.H., & Schwartz J. (2009). Elemental Carbon Exposure at Residence and Survival After Acute Myocardial Infarction. *Epidemiology*, 20(4): 547-554.
- Zagolski, F. & Gastellu Etchevory, J.P. (1995). Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on inversion of the 5S model, *Int. J. Remote Sensing*, 16(16): 3115-3146.
- Zanobetti, A., & Schwartz, J. (2007). Particulate Air Pollution, Progression, and Survival after Myocardial Infarction. *Environmental Health Perspectives*, 115(5): 769-775.
- Zhang G., Rui X., & Fan Y. (2018). Critical Review of Methods to Estimate PM<sub>2.5</sub> Concentrations within Specified Research Region, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* **2018**, 7, 368; doi:10.3390/ijgi7090368

## Annexe A : caractéristique des images CASI-2016 et données du vol

Données de télédétection :

Les images hyperspectrale sont des imagerie passive qui reçoivent le signal réfléchi par le système atmosphère-terre dans le domaine réflectif du spectre électromagnétique (soit les longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 2.5 micromètres). Le signale mesuré au niveau du capteur a été étalonné en luminance a des nombreuses bandes spectrales étroites pour chaque pixel comme l'illustre la figure 13.

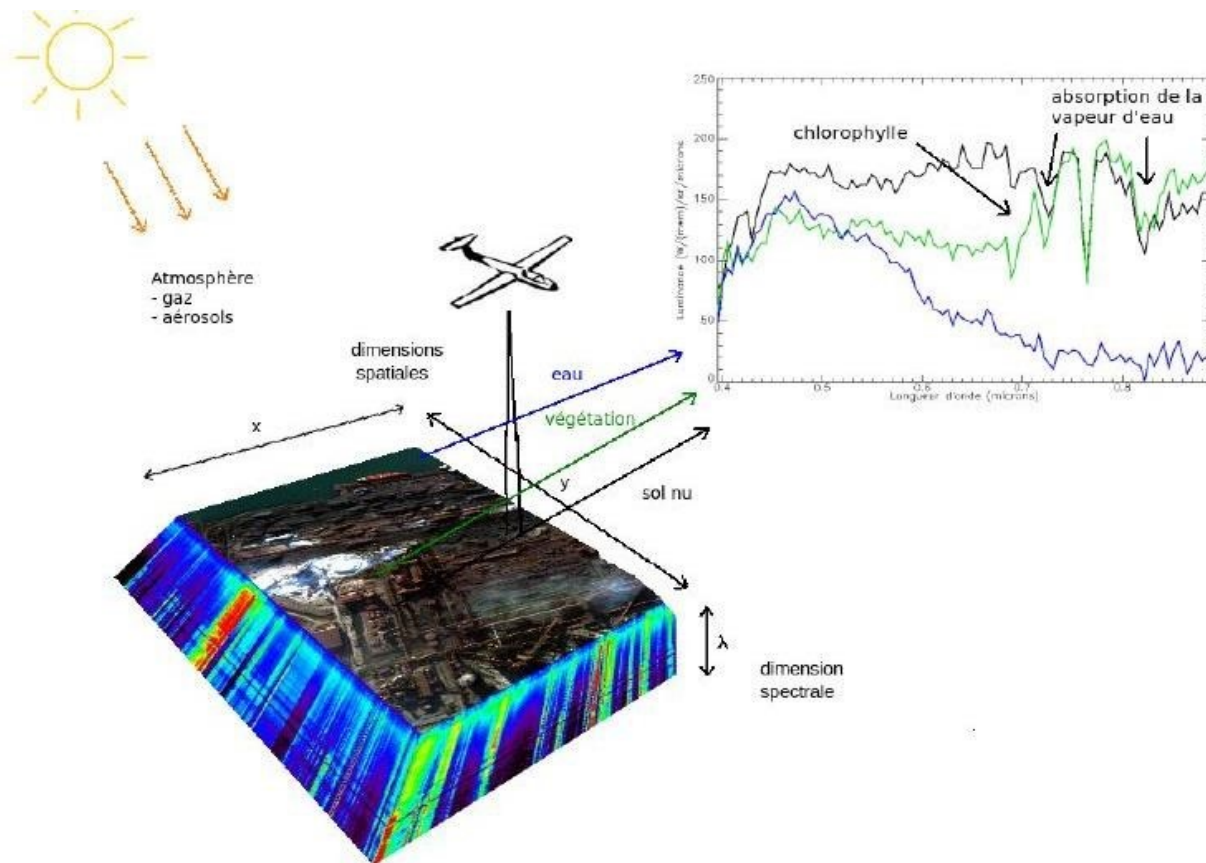


Figure A Cube des bandes qui montre le principe d'acquisition d'une image hyperspectrale. Chaque bande contient une mesure spectrale en luminance. (Deschamps, 2013).



Un petit aperçu dans la gamme hyperspectral. Il existe plusieurs types de capteurs dans différents longueurs d'ondes. Dans la figure 31 on remarque l'intervalle des longueurs d'ondes arrive jus 'au thermique 11500nm.

Tableau-A Heures de vol, azimut et altitude de vol pour chacune des lignes. Les heures de vol sont en heure normal de Greenwich (temps universel). Enregistrement des mesures météorologique au niveau de l'avion avec un disfonctionnement de la mesure dans quelque ligne de vol (sensor error).

FILE	LINE	GPS TIME (mid-line)			DAY	MONTH	YEAR	HEADING	ALITUDE	Pressure (kPa)	Temperature en °C	Humidity
		Hour	Minute	Second								
CASI_2016_08_03_105353	2	16	55	45	3	8	2016	-138	929,7	Sensor Error		
CASI_2016_08_03_110041	3	17	0	50	3	8	2016	47,5	922,5			
CASI_2016_08_03_110502	4	17		36	3	8	2016	-138	920,7			
CASI_2016_08_03_111043	5	17	11	17	3	8	2016	47,1	925,8			
CASI_2016_08_03_111557	6	17	16	54	3	8	2016	-137,2	919			
CASI_2016_08_03_112230	7	17	23	25	3	8	2016	48,1	934,8			
CASI_2016_08_03_112824	8	17	29	58	3	8	2016	-136,6	911,8			
CASI_2016_08_03_113505	9	17	36	35	3	8	2016	49	911			
CASI_2016_08_03_114210	10	17	43	36	3	8	2016	-139,1	916,3			
CASI_2016_08_03_114915	11	17	50	48	3	8	2016	46,4	908,9			
CASI_2016_08_03_115716	12	17	58	47	3	8	2016	-135,6	896			
CASI_2016_08_03_120455	13	18	6	24	3	8	2016	46,1	928,5			
CASI_2016_08_04_111206	14	17	13	47	4	8	2016	44,8	879,6	Sensor Error		
CASI_2016_08_04_111946	15	17	21	42	4	8	2016	-135,1	912,8			
CASI_2016_08_04_112819	16	17	30	11	4	8	2016	45,9	902,8	13,2	26	53,3
CASI_2016_08_04_113627	17	17	38	23	4	8	2016	-133,3	872	Sensor Error		
CASI_2016_08_04_114432	18	17	46	48	4	8	2016	44,7	906,1			
CASI_2016_08_04_115222	19	17	54	45	4	8	2016	-135,5	871,9			
CASI_2016_08_04_120128	20	18	3	31	4	8	2016	44,3	859,7	13	25	60,6
CASI_2016_08_04_120916	21	18	12	18	4	8	2016	-135,1	870,8	Sensor Error		
CASI_2016_08_20_090127	8	15	4	11	20	8	2016	47,2	1516,5	842	27,1	36,6
CASI_2016_08_20_091136	9	15	15	40	20	8	2016	-139	1539,9	837.2/2989	24.9/13	38,9
CASI_2016_08_20_092418	10	15	26	47	20	8	2016	46,1	1523,2	839	23,4	39,6
CASI_2016_08_20_093327	11	15	36	17	20	8	2016	-134,1	1521,8	840/2988	23	40,9
CASI_2016_08_20_094254	12	15	46	8	20	8	2016	45,5	1536,3	840	22,7	39,3
CASI_2016_08_20_095256	13	15	56	5	20	8	2016	-135,6	1534,5	839,5	22,8	41,6
CASI_2016_08_20_100321	14	16	6	24	20	8	2016	46,4	1526,5	840	22.6/14	38,7
CASI_2016_08_20_101343	15	16	17	24	20	8	2016	-137,4	1525,5	839,1	22,5	42,3
CASI_2016_08_20_102430	16	16	27	43	20	8	2016	46	1525,8	840	22,4	37,1
CASI_2016_08_20_103450	17	16	38	47	20	8	2016	-137,1	1528,1	837,5	22,5	37,1
CASI_2016_08_20_104634	18	16	53	41	20	8	2016	48,8	1543,7	840,3	22,4	40,1
CASI_2016_08_23_094242	34	15	44	12	23	8	2016	-127,9	1515,1	847,4	19,3	41,5
CASI_2016_08_23_094939	33	15	51	29	23	8	2016	37,5	1506,8	844,9	18,9	39,9
CASI_2016_08_23_095716	32	15	59	14	23	8	2016	-126,5	1499,3	847,3	19,1	41,7
CASI_2016_08_23_100533	31	16	7	46	23	8	2016	37,5	1499,7	845,9	18,6	37,9
CASI_2016_08_23_101319	35	16	14	5	23	8	2016	-126,4	1503,9	848,3	18,8	41,4
CASI_2016_08_23_101859	36	16	19	49	23	8	2016	35,6	1490,8	845,5	18,4	40,9
CASI_2016_08_23_102415	37	16	25	6	23	8	2016	-124,3	1510	850,6	18,5	38,7
CASI_2016_08_23_103223	30	16	38	28	23	8	2016	36,1	1522,4	845,1	18,3	41,7
CASI_2016_08_23_104834	29	16	54	52	23	8	2016	-125,4	1479,5	846,8	18,2	41,2

CASI_2016_08_24_091724	18	15	20	54	24	8	2016	36,3	1539,2	849,7	23.8/7	20,8
CASI_2016_08_24_092825	19	15	32	24	24	8	2016	-127,2	1511,2	848,1	23,3	24,6
CASI_2016_08_24_093949	20	15	44	6	24	8	2016	38,3	1531,3	846,1	23-déc	24,3
CASI_2016_08_24_095240	21	15	57	11	24	8	2016	-128,4	1504	846,7	23	35,3
CASI_2016_08_24_100604	22	16	10	29	24	8	2016	38,3	1523,5	850	23	33
CASI_2016_09_02_084745	28	14	54	3	2	9	2016	-126,9	1488	846.9/3017	18.1/3	44,5
CASI_2016_09_02_090354	27	15	10	13	2	9	2016	41,1	1490	846	15	54,2
CASI_2016_09_02_092026	26	15	26	32	2	9	2016	-128,5	1485,4	846,8	15,2	52,5
CASI_2016_09_02_093715	25	15	43	25	2	9	2016	38,7	1491,7	847,2	15,3	50,5
CASI_2016_09_02_095327	24	15	59	42	2	9	2016	-126,7	1488,3	848.4/3018	15.5/4	51,8
CASI_2016_09_02_100908	23	16	13	51	2	9	2016	38,7	1472,1	846,6	16	50,8
CASI_2016_09_03_091233	23	15	18	17	3	9	2016	-127,4	1491	850,6	20,1	19,4
CASI_2016_09_03_092733	22	15	32	27	3	9	2016	39,8	1470,7	848,3	19,2	13,9
CASI_2016_09_03_094235	5	15	44	36	3	9	2016	-130,2	1488,7	849.5/3026	16,4	17,4

Tableau-A1 Caractérisation des tuiles CASI-2016

Geo-corrected	Image Dimensions	File Size	SW Corner Coordinates (MTM08)		Pixel
Tile Name	Rows x Cols x Channels	(in GB)	Northing	Easting	Resolution
E2675N502275	2500 X 2500 X 96	1.2	5027500	267500	1.0m
E2675N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	267500	1.0m
E2675N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	267500	1.0m
E2675N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	267500	1.0m
E2675N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	267500	1.0m
E270N5027500	2500 X 2500 X 96	1.2	5027500	270000	1.0m
E270N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	270000	1.0m
E270N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	270000	1.0m
E270N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	270000	1.0m
E270N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	270000	1.0m
E270N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	270000	1.0m
E2725N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	272500	1.0m
E2725N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	272500	1.0m
E2725N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	272500	1.0m
E2725N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	272500	1.0m
E2725N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	272500	1.0m
E275N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	275000	1.0m
E275N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	275000	1.0m
E275N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	275000	1.0m
E275N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	275000	1.0m
E275N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	275000	1.0m
E2775N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	277500	1.0m
E2775N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	277500	1.0m

E2775N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	277500	1.0m
E2775N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	277500	1.0m
E2775N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	277500	1.0m
E280N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	280000	1.0m
E280N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	280000	1.0m
E280N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	280000	1.0m
E280N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	280000	1.0m
E280N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	280000	1.0m
E2825N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	282500	1.0m
E2825N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	282500	1.0m
E2825N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	282500	1.0m
E2825N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	282500	1.0m
E2825N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	282500	1.0m
E285N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	285000	1.0m
E285N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	285000	1.0m
E285N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	285000	1.0m
E285N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	285000	1.0m
E285N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	285000	1.0m
E285N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	285000	1.0m
E2875N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	287500	1.0m
E2875N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	287500	1.0m
E2875N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	287500	1.0m
E2875N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	287500	1.0m
E2875N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	287500	1.0m

E2875N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	287500	1.0m
-------------	------------------	-----	---------	--------	------

E2875N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	287500	1.0m
E2905N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	290000	1.0m
E290N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	290000	1.0m
E290N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	290000	1.0m
E290N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	290000	1.0m
E290N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	290000	1.0m
E290N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	290000	1.0m
E290N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	290000	1.0m
E2925N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	292500	1.0m
E2925N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	292500	1.0m
E2925N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	292500	1.0m
E2925N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	292500	1.0m
E2925N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	292500	1.0m
E2925N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	292500	1.0m
E2925N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	292500	1.0m
E2925N50475	2500 X 2500 X 96	1.2	5047500	292500	1.0m
E2925N505	2500 X 2500 X 96	1.2	5050000	292500	1.0m
E2925N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	292500	1.0m
E295N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	292500	1.0m
E295N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	292500	1.0m
E295N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	292500	1.0m

E295N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	292500	1.0m
E295N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	292500	1.0m
E295N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	292500	1.0m
E295N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	292500	1.0m

E295N50475	2500 X 2500 X 96	1.2	5047500	292500	1.0m
E295N505	2500 X 2500 X 96	1.2	5050000	292500	1.0m
E295N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	292500	1.0m
E295N5055	2500 X 2500 X 96	1.2	5055000	292500	1.0m
E2975N503	2500 X 2500 X 96	1.2	5030000	297500	1.0m
E2975N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	297500	1.0m
E2975N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	297500	1.0m
E2975N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	297500	1.0m
E2975N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	297500	1.0m
E2975N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	297500	1.0m
E2975N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	297500	1.0m
E2975N50475	2500 X 2500 X 96	1.2	5047500	297500	1.0m
E2975N505	2500 X 2500 X 96	1.2	5050000	297500	1.0m
E2975N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	297500	1.0m
E2975N5055	2500 X 2500 X 96	1.2	5055000	297500	1.0m
E2975N50575	2500 X 2500 X 96	1.2	5057500	297500	1.0m
E300N50325	2500 X 2500 X 96	1.2	5032500	300000	1.0m
E300N5035	2500 X 2500 X 96	1.2	5035000	300000	1.0m

E300N50375	2500 X 2500 X 96	1.2	5037500	300000	1.0m
E300N504	2500 X 2500 X 96	1.2	5040000	300000	1.0m
E300N50425	2500 X 2500 X 96	1.2	5042500	300000	1.0m
E300N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	300000	1.0m
E300N50475	2500 X 2500 X 96	1.2	5047500	300000	1.0m
E300N505	2500 X 2500 X 96	1.2	5050000	300000	1.0m
E300N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	300000	1.0m
E300N5055	2500 X 2500 X 96	1.2	5055000	300000	1.0m
E300N50575	2500 X 2500 X 96	1.2	5057500	300000	1.0m
E300N506	2500 X 2500 X 96	1.2	5060000	300000	1.0m
E3025N5045	2500 X 2500 X 96	1.2	5045000	302500	1.0m
E3025N50475	2500 X 2500 X 96	1.2	5047500	302500	1.0m
E3025N505	2500 X 2500 X 96	1.2	5050000	302500	1.0m
E3025N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	302500	1.0m
E3025N5055	2500 X 2500 X 96	1.2	5055000	302500	1.0m
E3025N50575	2500 X 2500 X 96	1.2	5057500	302500	1.0m
E3025N506	2500 X 2500 X 96	1.2	5060000	302500	1.0m
E305N50525	2500 X 2500 X 96	1.2	5052500	305000	1.0m
E305N5055	2500 X 2500 X 96	1.2	5055000	305000	1.0m
E305N50575	2500 X 2500 X 96	1.2	5057500	305000	1.0m
E305N506	2500 X 2500 X 96	1.2	5060000	305000	1.0m

## Numéro et longueur d'onde spectral des données hyperspectral CASI-2016

Channel	1	367.776nm	+/-	3.569nm
Channel	2	374.914nm	+/-	3.569nm
Channel	3	382.051nm	+/-	3.569nm
Channel	4	389.188nm	+/-	3.568nm
Channel	5	396.324nm	+/-	3.568nm
Channel	6	403.460nm	+/-	3.568nm
Channel	7	410.594nm	+/-	3.567nm
Channel	8	417.728nm	+/-	3.567nm
Channel	9	424.862nm	+/-	3.567nm
Channel	10	431.995nm	+/-	3.566nm
Channel	11	439.127nm	+/-	3.566nm
Channel	12	446.259nm	+/-	3.566nm
Channel	13	453.390nm	+/-	3.565nm
Channel	14	460.520nm	+/-	3.565nm
Channel	15	467.650nm	+/-	3.565nm
Channel	16	474.779nm	+/-	3.565nm
Channel	17	481.908nm	+/-	3.564nm
Channel	18	489.036nm	+/-	3.564nm
Channel	19	496.164nm	+/-	3.564nm
Channel	20	503.291nm	+/-	3.563nm
Channel	21	510.418nm	+/-	3.563nm
Channel	22	517.544nm	+/-	3.563nm
Channel	23	524.670nm	+/-	3.563nm
Channel	24	531.795nm	+/-	3.563nm
Channel	25	538.920nm	+/-	3.562nm
Channel	26	546.045nm	+/-	3.562nm
Channel	27	553.169nm	+/-	3.562nm
Channel	28	560.292nm	+/-	3.562nm
Channel	29	567.415nm	+/-	3.561nm
Channel	30	574.538nm	+/-	3.561nm
Channel	31	581.660nm	+/-	3.561nm
Channel	32	588.782nm	+/-	3.561nm
Channel	33	595.903nm	+/-	3.561nm
Channel	34	603.025nm	+/-	3.560nm
Channel	35	610.145nm	+/-	3.560nm
Channel	36	617.266nm	+/-	3.560nm
Channel	37	624.386nm	+/-	3.560nm
Channel	38	631.506nm	+/-	3.560nm
Channel	39	638.625nm	+/-	3.560nm
Channel	40	645.745nm	+/-	3.560nm
Channel	41	652.863nm	+/-	3.559nm
Channel	42	659.982nm	+/-	3.559nm
Channel	43	667.100nm	+/-	3.559nm
Channel	44	674.219nm	+/-	3.559nm
Channel	45	681.336nm	+/-	3.559nm
Channel	46	688.454nm	+/-	3.559nm
Channel	47	695.572nm	+/-	3.559nm
Channel	48	702.689nm	+/-	3.559nm
Channel	49	709.806nm	+/-	3.558nm
Channel	50	716.923nm	+/-	3.558nm
Channel	51	724.039nm	+/-	3.558nm
Channel	52	731.156nm	+/-	3.558nm
Channel	53	738.272nm	+/-	3.558nm
Channel	54	745.388nm	+/-	3.558nm
Channel	55	752.504nm	+/-	3.558nm
Channel	56	759.620nm	+/-	3.558nm
Channel	57	766.736nm	+/-	3.558nm
Channel	58	773.852nm	+/-	3.558nm
Channel	59	780.967nm	+/-	3.558nm
Channel	60	788.083nm	+/-	3.558nm
Channel	61	795.198nm	+/-	3.558nm
Channel	62	802.314nm	+/-	3.558nm
Channel	63	809.429nm	+/-	3.558nm
Channel	64	816.544nm	+/-	3.558nm



Channel	65	823.659nm	+/-	3.558nm
Channel	66	830.775nm	+/-	3.558nm
Channel	67	837.890nm	+/-	3.558nm
Channel	68	845.005nm	+/-	3.558nm
Channel	69	852.120nm	+/-	3.558nm
Channel	70	859.236nm	+/-	3.558nm
Channel	71	866.351nm	+/-	3.558nm
Channel	72	873.466nm	+/-	3.558nm
Channel	73	880.582nm	+/-	3.558nm
Channel	74	887.697nm	+/-	3.558nm
Channel	75	894.813nm	+/-	3.558nm
Channel	76	901.929nm	+/-	3.558nm
Channel	77	909.044nm	+/-	3.558nm
Channel	78	916.160nm	+/-	3.558nm
Channel	79	923.276nm	+/-	3.558nm
Channel	80	930.393nm	+/-	3.558nm
Channel	81	937.509nm	+/-	3.558nm
Channel	82	944.625nm	+/-	3.558nm
Channel	83	951.742nm	+/-	3.558nm
Channel	84	958.859nm	+/-	3.558nm
Channel	85	965.976nm	+/-	3.559nm
Channel	86	973.093nm	+/-	3.559nm
Channel	87	980.210nm	+/-	3.559nm
Channel	88	987.328nm	+/-	3.559nm
Channel	89	994.446nm	+/-	3.559nm
Channel	90	1001.564nm	+/-	3.559nm
Channel	91	1008.682nm	+/-	3.559nm
Channel	92	1015.801nm	+/-	3.559nm
Channel	93	1022.920nm	+/-	3.560nm
Channel	94	1030.039nm	+/-	3.560nm
Channel	95	1037.158nm	+/-	3.560nm
Channel	96	1044.278nm	+/-	3.560nm