

M. Chipperfield (Université de Leeds) décrit le monde évité par le protocole de Montréal. Sans celui-ci, un trou dans la couche d'ozone aurait pu apparaître régulièrement en Arctique dès 2010 et l'indice UV aurait excédé 50 aux tropiques à l'horizon 2100, dépassant de loin les valeurs extrêmes de 25 observés aujourd'hui. U. Langematz (FUB) utilise les scénarios du Giec pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution future de la couche d'ozone, tandis que D. Waugh (Université Johns-Hopkins) évoqua l'influence du trou d'ozone antarctique sur le climat et la circulation océanique dans l'hémisphère Sud. L'impact du protocole de Montréal sur la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre fut détaillé par G. Velders (RIVM). En effet, l'élimination des SAO a contribué à la protection du climat, car bon nombre de ces substances sont de puissants gaz à effet de serre. L'amendement de Kigali, adopté en octobre 2016, permet de réglementer la production des hydrofluorocarbures (deuxième génération de substituts aux SAO, non nocifs pour l'ozone) ayant un pouvoir de réchauffement global

élevé. S. Andersen (IGSD) et K. Fay (ARAP) évoquèrent ensuite la recherche des substituts aux SAO et le rôle de l'industrie dans le succès du protocole de Montréal, tandis que T. Birmipili (Ozone Secretariat) et S. Nair-Bédouelle (Ozone Action, branche d'ONU Environnement) décrivent la gouvernance du protocole et l'aide à sa mise en application auprès des pays en développement.

La dernière séance du symposium s'ouvrit par la présentation de S. Tilmes (NCAR) sur les risques potentiels que certains projets de géo-ingénierie pourraient faire courir à la couche d'ozone. V. Masson-Delmotte fit ensuite le lien entre le travail scientifique d'évaluation de l'état de la couche d'ozone et les rapports du Giec sur le changement climatique. Puis, R. Grundmann (Université de Nottingham) apporta un regard croisé sur les controverses liées à la destruction de la couche d'ozone et celles plus récentes sur le climat. Après la pause, une table ronde impliquant G. Brasseur, S. O. Andersen, R. Grundmann, T. Birmipili et G. Velders, animée par V. Masson-

Delmotte, aborda les leçons que l'on peut tirer du protocole de Montréal pour l'Accord de Paris sur le climat. Le symposium se conclut sur la présentation de P. Newman (Nasa) à propos des enjeux futurs de l'étude de la couche d'ozone et de l'application du protocole de Montréal.

Organisé dans le cadre élégant de la Fondation del Duca dépendant de l'Académie des Sciences, le symposium accueillit plus de 100 personnes, dont des étudiants en master-2 « Arctic Studies » de l'Université Paris-Saclay qui ont contribué par leurs questions aux échanges de la table ronde. Un live streaming permit à des personnes intéressées de suivre les présentations en temps réel. Le programme, les présentations et l'enregistrement du symposium sont disponibles sur le site <http://montreal30.io3c.org>.

Sophie Godin-Beekmann

Présidente de la Commission internationale sur l'ozone (IO3C)

Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales, UVSQ / UPMC / CNRS

Le projet Aerosols, radiation and clouds in Southern Africa (Aeroclo-sA)

Aeroclo-sA vise à mieux comprendre le climat d'Afrique australe et plus particulièrement de son pourtour atlantique, souligné par le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) comme l'un des régions du globe où le changement climatique pourrait être le plus évident.

En raison de la faible température des eaux de surface le long des côtes d'Afrique australe, cette région est caractérisée par des nuages de type stratocumulus marins, quasi permanents et localisés dans la couche limite marine. Les nuages stratiformes représentent le régime de nuages le plus efficace pour réfléchir le rayonnement solaire vers l'espace, induisant ainsi un effet radiatif négatif significatif au sommet de l'atmosphère, opposé à celui exercé par les gaz à effet de serre. Les propriétés microphysiques et optiques de ces stratocumulus affectent les gradients de température des eaux de surface de l'océan Atlantique et le bilan d'énergie à grande échelle, qui

déterminent la position de la zone de convergence intertropicale, et donc les moussons d'Afrique de l'Ouest et d'Asie.

Cette région est également caractérisée par de fortes charges en aérosols. En effet, l'Afrique australe est la plus importante source mondiale d'aérosols de feux de biomasse, qui se développent pendant la saison sèche de l'hémisphère Sud. Aussi, des étendues désertiques, notamment les déserts d'Etosha Pan et du Namib en Namibie, contribuent à l'émission de poussières, alors que l'upwelling du Benguela, parmi les plus productifs au monde en nutriments, contribue aux échanges de matière entre l'océan et l'atmosphère.

Or, les aérosols et les nuages sont des composantes essentielles du climat régional en Afrique australe, dont les effets sur le bilan radiatif (à travers leurs forçages direct, semi-direct et indirect) sont aujourd'hui très mal connus. En effet, il est désormais avéré que les incertitudes liées à la représentation de



Figure 1. (haut) La station mobile au sol Pegasus du Lisa positionnée à la station d'Henties Bay. Pegasus est un ensemble de deux conteneurs multi-instrumentés pour l'observation des gaz et des aérosols atmosphériques. On distingue le mât météorologique ainsi que des veines orientables au vent pour le prélèvement isocinétique à haut volume des aérosols, ainsi que les têtes de prélèvement pour les gaz. (bas) Le Falcon 20 de Safire prêt au décollage sur la piste de l'aéroport international de Walvis Bay, à 130 km au sud de Henties Bay. © J.-F. Doussin, Lisa/IPSL et L. Labbouz, Université d'Oxford.

leurs propriétés (microphysiques/optiques) dans les modèles de climat, et donc leur contribution au bilan radiatif régional, sont très importantes et affectent nos capacités de prévision du climat de cette région. En particulier, les modèles suggèrent que, dans cette région du monde, la présence d'aérosols absorbants de feux de biomasse transportés au-dessus des stratocumulus pourrait réduire le flux radiatif au sommet de l'atmosphère, au lieu de l'augmenter, provoquant ainsi un réchauffement régional comme le font les gaz à effet de serre.

Les problèmes rencontrés dans la modélisation du climat au niveau de l'Atlantique sud-tropical, notamment liés à la représentation des propriétés radiatives et microphysiques des aérosols et des nuages et à celle de la dynamique atmosphérique, sont en partie dus au faible nombre d'observations disponibles sur cette région.

Aeroclo-sA vise à combler ces lacunes, en apportant, à partir de mesures sol et aéroportées dans la colonne atmosphérique, de nouvelles observations des aérosols et de la structure thermodynamique de la couche limite atmosphérique et de la troposphère libre, afin d'évaluer leur représentation dans les modèles climatiques régionaux.

Un deuxième objectif est de fiabiliser la représentation des aérosols au-dessus des terres et au-dessus des nuages, via le développement d'algorithmes innovants permettant de déduire des nouvelles propriétés des aérosols conçus pour les nouvelles missions spatiales, notamment 3MI, héritier de Polder-3, et Iasi-NG, héritier de Iasi, sur *MetOp-SG*. Ce type de produit est en effet nécessaire pour acquérir une bonne représentation régionale des aérosols et pour étudier les tendances temporelles, comme leur variabilité interannuelle.

La campagne expérimentale du projet Aeroclo-sA s'est déroulée du 22 août au 12 septembre 2017 sur la côte Atlantique namibienne, avec le déploiement du Falcon 20 du Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement (Safire) et de la station mobile au sol Portable Gas and Aerosol Sampling Units (Pegasus) du Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (Lisa), illustré en figure 1.

Dix vols du Falcon 20 ont été effectués depuis l'aéroport international de

Walvis Bay (Namibie), pour un total de 30 heures de vol scientifique. Le Falcon 20 était équipé du lidar LNG (Leandre, nouvelle génération) développé au Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos) et opéré avec le soutien de la division technique Insu, permettant de « profiler » l'atmosphère à trois longueurs d'onde (355, 532 et 1 064 nm) afin d'analyser la structure et les caractéristiques radiatives des panaches d'aérosols. Il embarquait également les instruments Micropol-UV et Osiris développés au Laboratoire d'optique atmosphérique (LOA), mesurant les luminances totales et polarisées à plusieurs longueurs d'onde de l'ultraviolet jusqu'à l'infrarouge moyen. Osiris est le démonstrateur aéroporté du futur capteur embarqué 3MI. Aeroclo-sA a été aussi l'occasion d'embarquer pour la première fois le photomètre solaire Plasma à bord du Falcon 20, pour mesurer l'extinction par les aérosols au-dessus et entre les stratocumulus. Le système de largage de dropsondes, les instruments radiométriques (pyranomètre et pyrgeomètre en visées haute et basse, radiomètre infrarouge Climat), les sondes de pression, température, humidité et vent, et les capteurs optiques de microphysiques des nuages

et des aérosols opérés par Safire, ont complété la charge utile du Falcon 20.

La planification des opérations aéroportées a été facilitée par la mise en place d'une chaîne opérationnelle de prévision de Meso-NH (modèle à méso-échelle non hydrostatique à 5 km de résolution) des événements de poussières et de feux de biomasse dans la zone d'étude, exploitée par le Laboratoire d'aérodologie (LA). Les prévisions ont été mises à disposition sur le site <http://aeroclo.sedoo.fr/> créé par le Service des données national Aeris.

La station mobile au sol Pegasus a fonctionné sur le campus du centre de recherche Sanumarc de l'université de Namibie à Henties Bay (22°6'S, 14°30'E), qui héberge déjà depuis 2012 un site d'observation de long terme piloté par le Lisa en collaboration avec l'université de Namibie et la NorthWest University en Afrique du Sud. Pegasus est équipé de veines de prélèvements isocinétiques pour les aérosols et les gaz atmosphériques. La composition chimique des aérosols a été étudiée par un ensemble instrumenté incluant des prélèvements sur filtre, un spectromètre de masse à temps de vol (c-ToF-AMS) de l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (Ircelyon), un

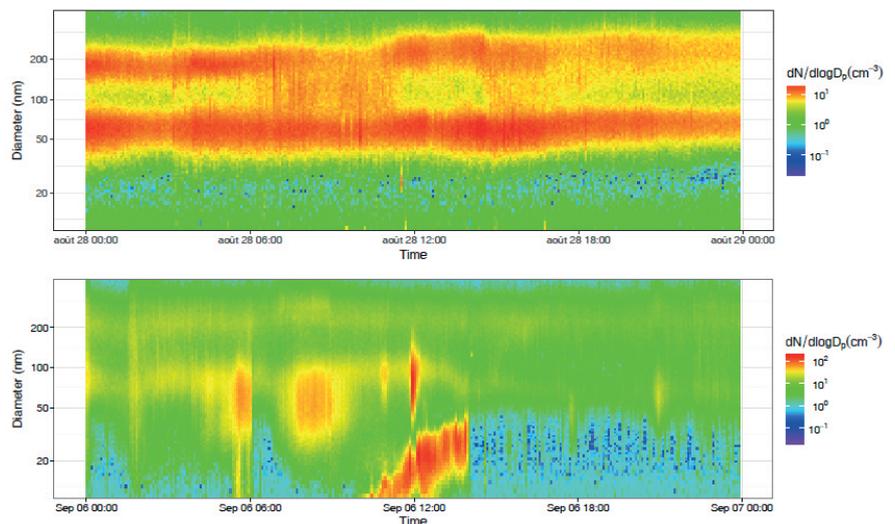


Figure 2. Dynamique temporelle de la distribution en taille de la fraction fine des aérosols observée dans la couche limite marine par l'instrument SMPS dans Pegasus à Henties Bay. (haut) Le 28 août 2017 était caractérisé par des forts vents provenant du nord-ouest et atteignant 6 m s^{-1} dans l'après-midi. L'aérosol est essentiellement d'origine maritime, probablement primaire en lien avec les sels marins émis par les vents forts. Sa distribution en taille est caractérisée par deux modes intenses et persistants, centrés à 50 et 200 nm. (bas) Le 6 septembre 2017, le vent tourne plutôt au sud, longeant davantage la ligne côtière. Les modes granulométriques à 50 et 200 nm sont affaiblis. On observe deux phénomènes supplémentaires : un épisode de formation de nouvelles particules à partir de 11 h UTC, clairement identifiable par l'augmentation de la concentration en particules dans la limite basse du domaine d'observation (10 nm), puis par la croissance progressive de leur taille jusqu'à 20 nm à environ 13 h, quand l'arrivée soudaine d'un nuage stratiforme lessive complètement les aérosols dans l'air provoquant ainsi la baisse abrupte des concentrations observées. © T. Bourriane, CNRM, CNRS/Météo-France ; J.-F. Doussin, Lisa/IPSL ; M. D. Mallet, Ircelyon, CNRS/Université de Lyon 1.

instrument de type *Particle Into-Liquid sampler* (Pils) couplé à un chromatographe ionique double-voie opéré par le Lisa, et un *Single Particle Soot Photometer* (SP2) opéré par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM) pour mesurer, par incandescence, la présence de carbone suie dans les particules. Les concentrations en nombre et en masse, la distribution en taille, les propriétés optiques de diffusion, extinction et absorption, les propriétés hygroscopiques et les spectres d'activation des aérosols en gouttelettes nuageuses ont été également mesurés en continu. Le dispositif au sol a été complété par des mesures de distribution en taille des gouttelettes, par une station météorologique et deux lidars, dont le système MPL géré par le Goddard Space Flight Center (GSFC) de la Nasa. Le site de Henties Bay fait partie du réseau de photomètres Aeronet/Photons, fortement développé en Namibie ces dernières années pendant la préparation de la

campagne. Des prélèvements d'eau du nuage stratiforme ont également été effectués par le Laboratoire de chimie de l'environnement (LCE) et l'Arizona State University (ASU), lors d'événements observés au sol pour une caractérisation chimique off-line.

Au cours de la campagne, la couche limite marine était caractérisée par des faibles températures et de forts vents qui ont favorisé les émissions primaires de particules depuis l'océan, fournissant un niveau de fond riche en particules de sels de mer. Plusieurs épisodes de transport de masses d'air oxydées, caractérisées notamment par des particules de sulfate d'origine non marine et d'aérosols organiques oxydés, ont été détectés. Les observations au sol ont également permis de mettre en évidence des épisodes répétés de formation de nouvelles particules en lien avec les périodes d'ensoleillement, même brèves (figure 2). Les mesures à la station ont montré que les aérosols avaient une forte

propension à adsorber la vapeur d'eau atmosphérique, appuyant l'idée qu'ils pourraient jouer un rôle comme noyaux de condensation qui sous-tendent la formation des stratocumulus marins. En parallèle, les observations aéroportées ont permis de documenter l'évolution des propriétés radiatives des panaches de feux de biomasse et des poussières désertiques transportés dans la troposphère libre depuis les zones sources, autour de l'Etosha Pan en Namibie, jusqu'à l'océan. Le mélange entre ces types d'aérosols et la formation de nuages au sein de ces panaches chauds et humides a pu être observé (figure 3). Ces observations ont également permis d'étudier les émissions d'aérosols terrigènes le long de la côte namibienne. La campagne aéroportée a bénéficié d'une situation météorologique particulièrement favorable au transport des aérosols le long de la côte namibienne dans le rayon d'action du Falcon 20. Une couche d'aérosol de feux de biomasse de 3 à 4 km d'épaisseur en provenance de l'Angola (figure 4) a pu être documentée *in situ* et à l'aide des instruments de télédétection au-dessus de différents types de surfaces océaniques (ciel clair et en présence de stratocumulus) et terrestres (désert, lac asséché, c'est-à-dire surface fortement réfléchissante). L'influence des aérosols de biomasse sur le rayonnement réfléchi par les nuages stratiformes a pu être clairement observée par les mesures de luminance spectrale, totale et polarisée (figure 5), qui serviront de base de travail aux développements algorithmiques futurs.

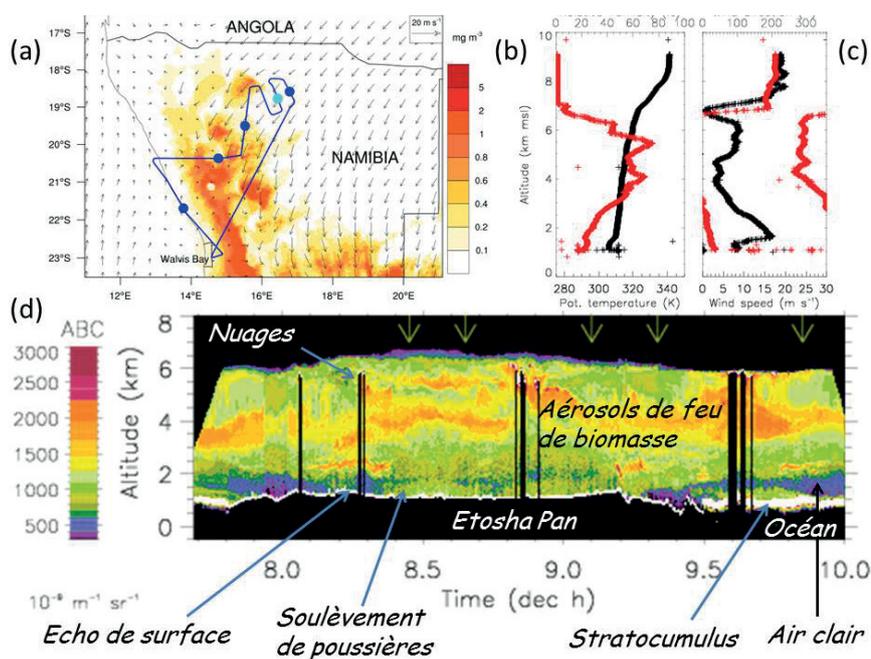


Figure 3. (a) Flux d'émission de poussières au-dessus de la Namibie (couleur) et champ de vent à 10 m issu de la prévision Meso-NH (5 km de résolution horizontale) à 09 h 00 UTC le 5 septembre 2017. Le trait noir matérialise la trace au sol du Falcon 20 au cours du vol entre 07 h 36 et 10 h 14 UTC. Les points bleus et turquoise représentent la position des cinq dropsondes larguées au cours du vol. (b) Profils de température potentielle (noir) et humidité relative (rouge) obtenus à partir de la dropsonde n° 2 (08 h 40 UTC, point turquoise en (a)). (c) comme (b) mais pour la vitesse du vent (noir) et la direction du vent (rouge). (d) Coefficient de rétrodiffusion atmosphérique à 1 064 nm en fonction de l'altitude obtenue sous l'avion à partir du lidar LNG. On y distingue la couche d'aérosols de feu de biomasse entre 2 et 6 km ainsi que les soulèvements de poussières sur l'Etosha Pan. On peut également observer la présence de stratocumulus sur l'océan. La couche d'aérosols au-dessus des stratocumulus résulte du transport des poussières depuis Etosha. Au-dessus de l'océan, cette couche de poussières est séparée de la couche d'aérosols de feu de biomasse par une couche beaucoup moins chargée en particules. Les données dropsondes indiquent que la couche d'aérosols de feu de biomasse est advectée depuis le nord-ouest au-dessus d'Etosha. On distingue également la présence d'un jet de basse couche du nord d'une intensité de 17 m s⁻¹ vers 1,7 km au-dessus du niveau de la mer (400 m au-dessus du sol) à l'origine des soulèvements de poussières. © C. Flamant, Latmos/IPSL et J.-P. Chaboureaux, LA.



Figure 4. Sur cette photo, prise depuis l'avion le 5 septembre 2017, on peut voir un « océan » de particules de feux de biomasse surplombant la Namibie. L'épaisseur optique en aérosols est de 1,5 à 500 nm à Windpoort (nord du pays). Du fait de cette énorme quantité d'aérosol, il est impossible de voir le sol. On constate que la présence d'humidité au sommet des panaches de particules de biomasse permet à des nuages de se former au sommet (vers 6 km d'altitude). © F. Blouzon, DT-Insu/CNRS.

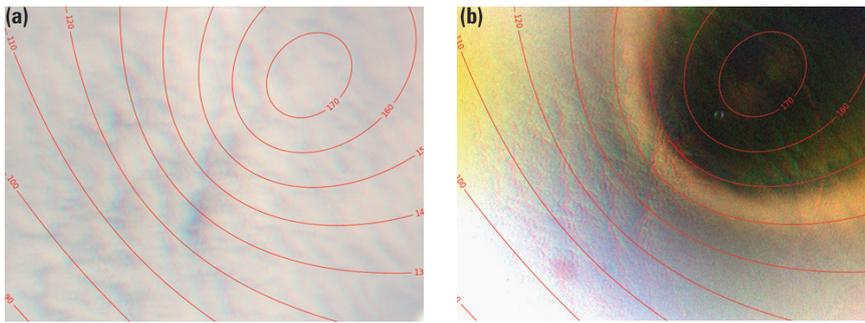


Figure 5. Compositions colorées réalisées à partir (a) des luminances totales et (b) des luminances polarisées des canaux 490, 670 et 865 nm observées par l'instrument Osiris au-dessus d'une scène nuageuse. Les cercles concentriques représentent les isocontours d'angle de diffusion par pas de 10° . En luminance totale (a), les nuages rétrodiffusent fortement le rayonnement, ce qui produit un signal intense. Son amplitude est modulée par l'épaisseur optique du nuage dans le domaine visible. En polarisation (b), on observe une forte signature angulaire du signal, caractéristique de la diffusion du rayonnement par les gouttelettes sphériques. La structure principale est le pic de polarisation autour de 140° qui forme un cercle sur la figure. C'est l'arc primaire, une caractéristique des nuages d'eau liquide, qui correspond typiquement à un signal polarisé intense, présentant une faible dépendance spectrale. La figure montre que l'arc primaire est ici assombri et prend une couleur brune à cause de la présence d'aérosols localisés au-dessus du nuage. Les aérosols atténuent ici le signal réfléchi par le nuage dans la région de l'arc-en-ciel. De par leur taille (rayon granulométrique de $0,1 \mu\text{m}$), les particules de brûlis présentent une épaisseur optique qui diminue rapidement avec la longueur d'onde. On observe ainsi une variation spectrale de l'atténuation pour ces aérosols, ce qui entraîne une modification de la couleur apparente de l'arc. Pour des angles de diffusion inférieurs à 100° , la diffusion par ces petites particules, localisées au-dessus du nuage, polarise très efficacement le rayonnement et on observe également une création de polarisation (visible dans la partie inférieure gauche de l'image). La création de polarisation par diffusion et l'atténuation spectrale de l'arc sont les deux effets qui permettent la détection des aérosols localisés au-dessus des nuages à partir d'un instrument de type 3MI. © F. Waquet et J.-M. Nicolas, LOA.

Remerciements

Le projet Aeroclo-sA est soutenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR), les programmes Lefe (Les enveloppes fluides de l'environnement), PNTS (Programme national de télédétection spatiale) et Pics (Projet international de coopération scientifique) de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS, le programme Tosca (Terre, océan, surfaces continentales, atmosphère) du Cnes, le partenariat bilatéral Hubert Curien franco-sud-africain Protea du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, le projet européen European Fleet for Atmospheric Research (Eufar) et la National Research Foundation (NRF) d'Afrique du Sud. Safire est l'unité mixte de service du CNRS, de Météo-France et du Cnes opérant les avions de recherche français.

Paola Formenti

Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques, Institut Pierre-Simon Laplace, CNRS / Université Paris Est Créteil / Université Paris Diderot, Créteil

Landex : mieux comprendre la formation et le devenir des aérosols organiques secondaires d'origine biogénique

Les particules atmosphériques ont des effets directs et indirects potentiellement importants sur la qualité de l'air et le climat, fortement dépendants de leur composition chimique et des propriétés optiques qui y sont associées. Si les politiques environnementales se multiplient depuis plusieurs années pour réglementer et contrôler les émissions d'aérosols primaires dans l'atmosphère, il est beaucoup plus difficile d'agir efficacement contre les particules dites secondaires, qui se forment dans l'atmosphère suite à des processus chimiques et photochimiques complexes. La formation et le devenir des aérosols organiques secondaires (AOS) sont ainsi devenus ces dernières années des objets d'étude importants en sciences atmosphériques.

À l'échelle du globe, les aérosols organiques secondaires sont formés *via* des processus non linéaires dépendant de plusieurs facteurs et précurseurs qui sont aujourd'hui plus ou moins bien paramétrés, comme les émissions



Vue de la parcelle forestière de Bilos dans la forêt des Landes. Photo : Julien Kammer.

biogéniques issues de la végétation. Même dans les grandes métropoles européennes comme Paris, des études récentes ont montré la prévalence des aérosols secondaires biogéniques sur le bilan total de l'aérosol organique mesuré durant les saisons d'été, complexifiant un peu plus notre représentation de la

problématique en milieu urbain basée jusque-là sur les sources anthropiques dues au transport et au chauffage.

Les AOS biogéniques sont produits principalement par des processus de condensation des produits d'oxydation de composés organiques plus ou moins