

La pollution de l'air par les aérosols : 35 ans de mesures quotidiennes!

Alain Royer et Norm T. O'Neill, professeurs émérites,
Université de Sherbrooke
Département de géomatique appliquée
Chercheurs au Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL)

La bonne nouvelle, c'est que la pollution de l'air n'augmente pas à Sherbrooke! L'air y est toujours aussi propre à respirer, malgré l'expansion économique de la région. Depuis 35 ans, Alain Royer et Norm T. O'Neill (AR&NTO), tous les deux professeurs-chercheurs émérites à l'Université de Sherbrooke, pionniers dans le domaine, mesurent les aérosols atmosphériques, ces microparticules liquides ou solides en suspension dans l'air, d'origine anthropique ou naturelle (Fig. 1). En 2024, ils ont fêté les 30 ans du premier réseau canadien de suivi des aérosols, le réseau AEROCAN (Aérosol Canada), qu'ils ont développé. Cet article retrace les moments clés de cette « *success story* »¹.



Fig. 1 Les aérosols naturels (désert, volcan, marins, feux) ou anthropiques (pollution urbaine, économique et industrielle, transport, feux de cheminée). Leur impact sur le climat dépend de plusieurs de leurs caractéristiques (nature, taille et position dans la haute ou basse atmosphère) (voir l'encadré à la fin de l'article).

Au début, en 1989, les mesures étaient manuelles, puis en 1994, avec l'aide du gouvernement fédéral, AR&NTO acquièrent cinq instruments automatiques, des radiomètres solaires de la compagnie française Cimel. Plus il y a d'aérosols dans l'air, plus la lumière solaire directe est atténuée. La mesure de cette atténuation permet d'estimer la concentration en aérosols et de faire le suivi de la qualité de l'air (Fig. 2).

¹ Pour les références à leurs travaux, consulter la liste des publications d'Alain Royer et de Norm O'Neill sur le répertoire des spécialistes de l'Université de Sherbrooke (<https://www.usherbrooke.ca/recherche/fr/specialistes>)

Très vite, un an plus tard en 1995, AR&NTO s'associe au réseau américain de la NASA : AERONET (aeronet.gsfc.nasa.gov), qui vient aussi de se mettre en place avec de plus gros moyens financiers et qui accepte de traiter toutes leurs données en temps réel. Un de ces instruments, le premier, est installé sur le toit de la Faculté des lettres et des sciences humaines, très bien situé en bas du campus d'où on peut suivre la trajectoire presque complète du soleil du matin jusqu'au soir. En 1999, ils convainquent le Service météorologique canadien d'assurer la gestion et la maintenance du réseau AEROCAN. Un soulagement pour les deux jeunes chercheurs dont la mission est plutôt de se concentrer sur le développement des méthodes d'analyse des aérosols et sur l'étude de leur évolution à travers le Canada. Ils remportent ainsi plusieurs succès notables.

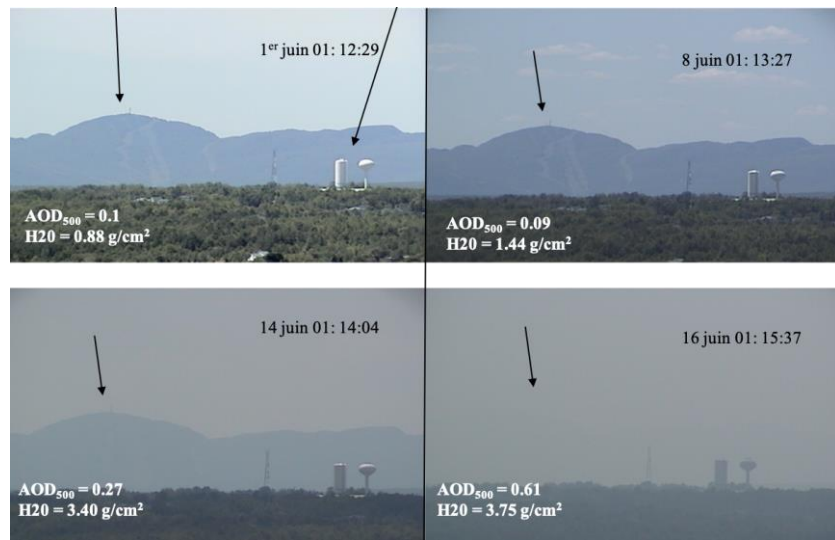


Fig.2 Variation de la visibilité atmosphérique, vue du toit du site AEROCAN de mesure des aérosols de l'Université de Sherbrooke. Le mont Orford est à une distance de 25 km et le réservoir d'eau (blanc) est à 5 km (flèches). Les valeurs mesurées de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) et de la quantité de vapeur d'eau (H₂O) sont données pour chacune des photos. La visibilité des 1^{er} et 8 juin 2003 (en haut) est excellente, alors que l'atmosphère des 14 et 16 juin 2003 est exceptionnellement très polluée (en bas).

En 2006, Norm O'Neill reçoit le Prix de la recherche et de la création de l'Université de Sherbrooke pour un « *scoop* » sur le développement d'une méthode originale de discrimination des grosses et petites particules par radiométrie solaire multispectrale (la méthode « SDA », *Spectral Deconvolution Algorithm*, article dont il est le premier auteur et co-signé par Alain Royer et leurs collègues de la NASA (article cité plus de 800 fois). Cette méthode relativement simple et très efficace est aussitôt intégrée à la chaîne des traitements du réseau AERONET. Cet algorithme est utilisé par des centaines de chercheurs qui ont l'adopté, car cette caractérisation de la taille des particules permet des avancées scientifiques significatives quant à leur impact sur le climat. C'est un paramètre clé dans le suivi du réchauffement climatique de la Terre (voir l'encadré à la fin de l'article).

En 2008, AR&NTO reçoivent le Prix de l'innovation en développement durable de la Fondation estrienne de l'environnement pour le réseau AEROCAN.

En 2016, les instruments solaires utilisés deviennent aussi lunaires et scrutent les aérosols de nuit avec le rayonnement de la Lune, en plus de ceux du jour avec le Soleil. Une avancée majeure pour l'Arctique où il fait nuit la moitié de l'année!

En 2021, Alain Royer reçoit le Prix Ferdinand-Bonn de L'Association québécoise de télédétection en reconnaissance du caractère exceptionnel de ses réalisations et de sa carrière.

En 2022, les professeurs émérites Alain Royer et Norm O'Neill prennent leur retraite officielle, mais toujours passionnés, ils poursuivent leurs recherches! Norm O'Neill compte plus de 12 000 citations.

En 2024, AERONET fédère 5 réseaux à travers le monde en plus du réseau canadien AEROCAN et compte 574 stations actives. AEROCAN comprend 19 stations de l'Extrême-Arctique, à Alert, Nu (80.5°N) jusqu'au sud de l'Ontario (Toronto, Ont., 43.8°N) et d'est (Halifax, N.-E., 64°O) en ouest (Île Saturna, près de Victoria, B.-C., 123°O) (Fig. 3).



Fig. 3 Le réseau des stations AEROCAN en 2024 (19 stations actives). Les quatre stations arctiques, une des particularités originales de ce réseau, sont en cyan. Fond de carte Google Earth.

AEROCAN, comme presque toutes les stations AERONET, utilise le même instrument (Radiomètre Cimel CE318-TS9). Il est constitué d'un petit robot intelligent équipé d'un court télescope sans lentille qui dort la tête en bas, et toutes les 5 minutes quand il fait jour et qu'il ne pleut pas, il tourne sa tête pour fixer le soleil, prendre une mesure et va se

remettre au repos la tête en bas. La nuit, il pointe la Lune si elle est dans sa phase éclairée à plus de 50 %.

Une climatologie de 35 ans de mesures des aérosols à Sherbrooke est montrée à la Figure 4. C'est la plus longue série existante pour le Canada.

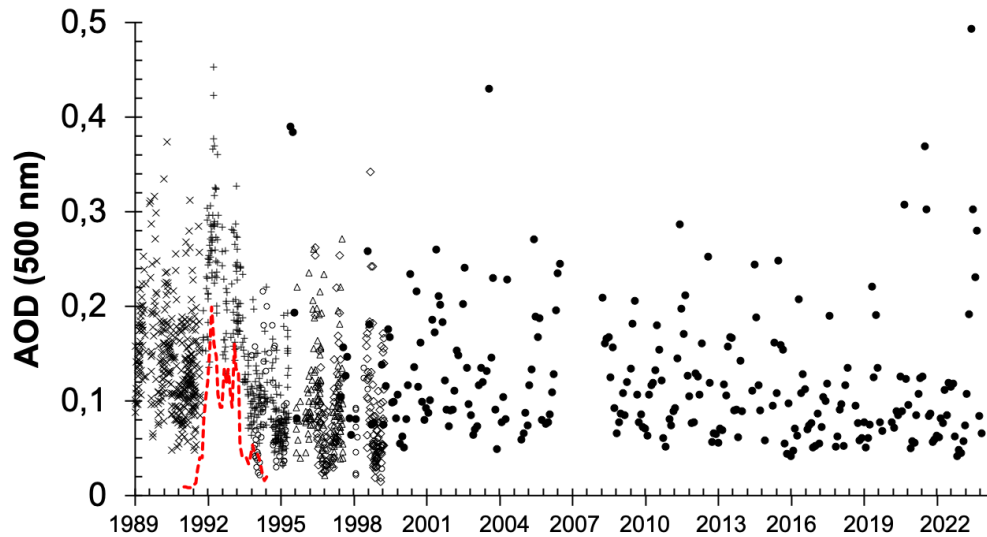


Fig. 4 Épaisseur optique des aérosols (AOD) (paramètre optique relatif, sans unité, lié à la concentration d'aérosols intégrée sur la colonne atmosphérique) de 1989 à 2024 à Sherbrooke (45.4°N; 71.9°O). Les valeurs de l'AOD sont dérivées des mesures de radiométrie solaire à la longueur d'onde de 500 nm et sont des moyennes journalières avant 1997 (symboles ouverts, x et +) et mensuelles après 1997 (rond noir plein). Le trait pointillé rouge correspond à l'AOD stratosphérique dérivée d'images satellites sur un pixel au-dessus du site de mesures. Les variations observées mettent en évidence le pic significatif résultant du nuage de particules de sulfate éjectées (aérosols liquides) par le volcan Pinatubo en juin 1991. Sur la période de 35 ans analysée, il n'y a pas de tendance à la hausse des valeurs de l'AOD mesurées au sol, montrant une atmosphère généralement très claire, correspondant à une concentration d'aérosols très faible de l'ordre de 5 micro-g/m³. En général, la gamme de variation de l'AOD varie de 0.05 jusqu'à ~3 pour des atmosphères très polluées (Source : AEROCAN/AERONET Climatology Data V3, Level 2.0 Quality Assured Data, cloud screened).

Suivi des aérosols arctiques, de jour comme de nuit

Ces dernières années, Norm O'Neill s'est concentré sur les aérosols arctiques qui ont un impact majeur sur le climat. Bien qu'en plus faible concentration car loin des sources, donc très difficiles à détecter, ils contribuent globalement à refroidir l'Arctique; un effet en partie contrebalancé par les particules de carbone qui réchauffent l'atmosphère. Les particules désertiques et de carbone (issues des feux de forêt) ainsi que les poussières générées par l'érosion éolienne des bassins hydrographiques locaux de l'Arctique libérés par la fonte des glaces accélèrent la fonte de la neige et de la glace une fois déposées, par diminution de l'albédo de la surface (de son pouvoir réfléchissant). Ces impacts s'ajoutent aussi à ceux

indirects par leur rôle dans la formation de gouttelettes de nuages (voir l'encadré à la fin de l'article).

En 2019, le radiomètre lunaire installé à Eureka, Nunavut a permis de détecter automatiquement un événement de pollution arctique pendant la nuit polaire, du 16 au 20 février 2019. Un panache d'air pollué de microparticules de sulfate, d'origine asiatique, a créé un phénomène de « brume arctique » (*Arctic haze*) durant 2 jours qui a pu être caractérisé grâce à la méthode « SDA » (Fig. 5).

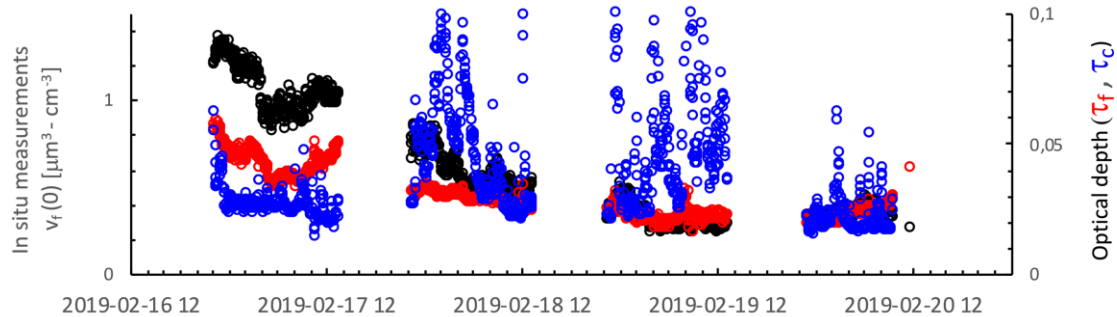


Fig. 5 Concentration en aérosols atmosphériques mesurée à la station arctique d'Eureka, Nunavut (80°N) du 16 au 20 février 2019, exprimée en concentration volumétrique des petits aérosols ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$) (points noirs, échelle de gauche) et en épaisseur optique des aérosols (AOD, *Aerosol Optical Depth*) des « petites » particules (submicroniques) (points rouges) et des « grosses » particules (supermicroniques) (points bleus) (échelle de droite). Les mesures optiques d'AOD durant la nuit polaire ont pu être réalisées grâce au radiomètre lunaire pour le suivi automatique des aérosols de cette station d'AEROCAN. La discrimination entre les types de particules est dérivée de l'algorithme original SDA de Norm O'Neill, Alain Royer et des collaborateurs de la NASA (voir texte). Le fort pic de petits aérosols le 17 février (points noirs et rouges) correspond à un nuage de pollution (« brume arctique », « *Arctic haze* »), alors que les pics mesurés les 18 et 19 février (points bleus) correspondent aux cristaux de glace naturels en suspension dans l'air. Ces mesures sont cohérentes avec des simulations d'un modèle global de suivi de l'AOD des petits aérosols de sulfate provenant d'un événement de pollution de l'Asie.

AEROCAN en support aux observations satellites

Une autre retombée importante de ce réseau de mesures au sol est leur utilisation pour valider les nouvelles méthodes d'analyses des aérosols par satellite qui se développent sans cesse avec l'essor technologique constant des missions satellites. En 1998, Alain Royer traquait déjà, à partir d'archives satellites, le nuage d'aérosols éjecté par la phénoménale éruption du volcan Pinatubo dans les Philippines en juin 1991. Ces aérosols atteignent la haute atmosphère et se répendent sur tout le globe (voir la Fig. 4). Ils provoquent par un effet d'écran au rayon solaire une baisse de température mondiale de -0.5° à lui tout seul pendant un an, du jamais vu! Norm O'Neill analyse par satellite les panaches des feux de forêt qui parcourent des milliers de kilomètres à travers le Canada (Fig. 6). Ces aérosols de suie de carbone issus de la combustion du bois ont un impact mondial sur le réchauffement de la planète. Les observations satellites permettent aussi de suivre les gigantesques

panaches de fines particules désertiques soulevées par de violentes tempêtes de vent jusque dans la haute atmosphère; ces particules qui parcourent ainsi des milliers de kilomètres, du Sahara à travers l'Atlantique ou du désert de Gobie, en Mongolie, jusque chez nous.

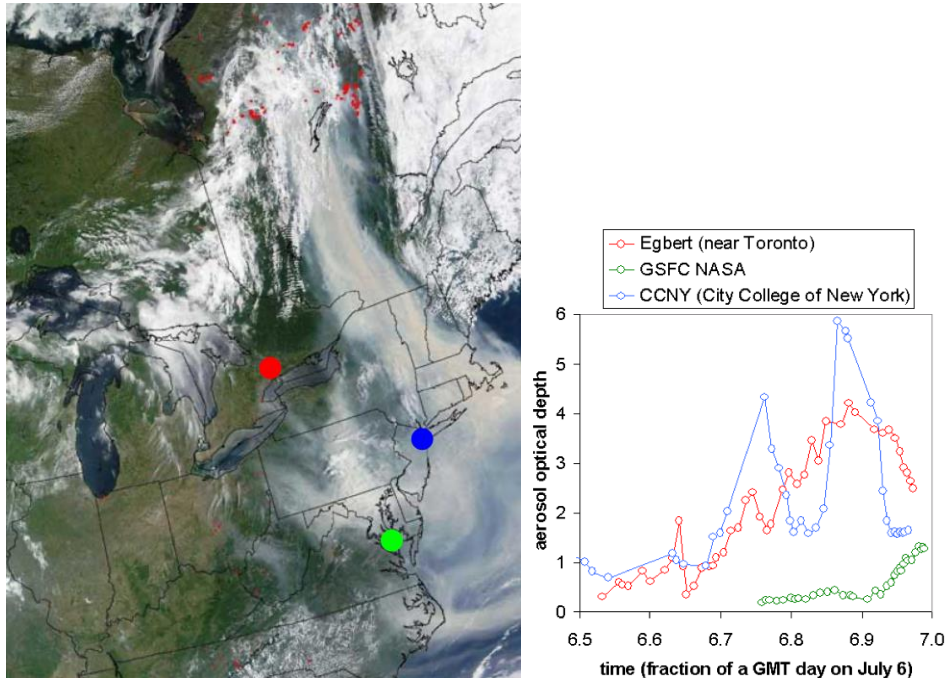


Fig. 6 Image satellite (MODIS) de l'énorme panache de fumée (en gris) résultant des gigantesques feux de forêt survenus en juillet 2002 dans la région de la Baie James (Nord du Québec). Ces panaches ont été visibles aux stations d'Egbert, près de Toronto (point rouge) et celles de la côte Est des États-Unis (New York, point bleu, et Washington, point vert). Les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols ont été exceptionnellement hautes le 6 juillet 2002 (Figure de droite).

Nos travaux de recherche grâce au réseau AEROCAN ont aussi contribué au succès mondial des observations de l'extraordinaire constellation de satellites constituée du satellite EOS-TERRA (MODIS, MISR) et du « train » de 5 satellites volant en formation durant 20 ans (2002-2022) : le « A-train » : PARASOL (POLDER), EOS-Aqua (MODIS), CALIPSO, CloudSat et GCOM-W1. Ces capteurs qui permettaient entre autres de mesurer et caractériser les aérosols atmosphériques ont été validés par les mesures au sol (AEROCAN/AERONET) et ont permis par la suite leur suivi partout dans le monde. Ce succès se poursuit actuellement avec la mission EarthCARE (lancée le 29 mai 2024), et se poursuivra, on l'espère, avec la future mission internationale AOS (système d'observation de l'atmosphère) pilotée par la NASA et auxquelles participe l'Agence spatiale canadienne avec la mission AVENIR (lancement prévu en 2031).

Depuis mai 2024, un nouveau satellite géostationnaire, ceux qui tournent avec la Terre, : Tempo (*Tropospheric Emissions : Monitoring of Pollution instrument*) cartographie, par spectroradiométrie de la lumière réfléchiée par la surface, la pollution de l'air : ozone, dioxyde d'azote (NO₂) et aérosols, toutes les 40 minutes, tous les jours, sur toute

l'Amérique du Nord (sur les zones sans nuages). C'est une première mondiale. Les images de concentration de NO₂, ce gaz nocif pour la santé respiratoire issue des activités humaines dont principalement du transport et des centrales aux combustibles fossiles, sont disponibles gratuitement pour la communauté (Fig. 7a, 7b). Ce gaz joue aussi un rôle important dans la formation de l'ozone des basses couches atmosphériques, engendrant le bien connu « smog » urbain. Le produit aérosol est en cours de validation et n'est pas encore disponible.

Les données AEROCAN, associées aux images satellites, ont permis pendant 30 ans de faire un meilleur suivi de la qualité de l'air que l'on respire et de mieux comprendre le réchauffement climatique de la planète. Ce réseau de mesures est toujours actif.

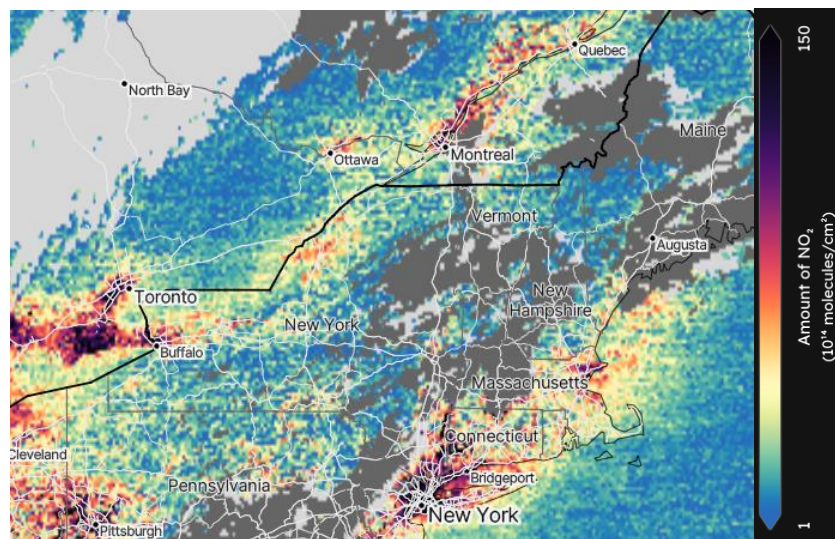


Fig. 7a Image du satellite TEMPO de concentration de dioxyde d'azote (NO₂) le 4 octobre 2024 sur l'Est de l'Amérique du Nord. Issu principalement des véhicules à essence et au diesel, ce gaz nocif est surtout concentré au-dessus des grandes agglomérations (Toronto, Montréal, New York...) (en rouge-noir) et des grands axes de transport routier (vallée du Saint-Laurent, par exemple). Les zones en gris correspondent aux nuages qui masquent la surface et où la mesure n'est pas possible.

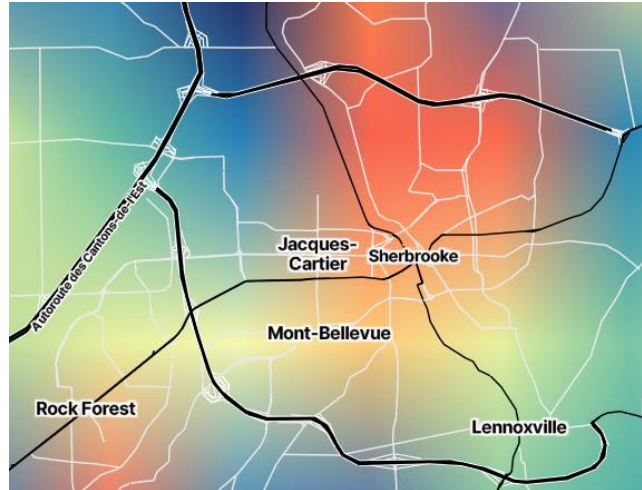


Fig. 7b Zoom de la Figure 7a sur la région de Sherbrooke. Les concentrations de dioxyde d'azote sont plus importantes (en rouge) dans la vallée de la rivière Saint-François.

Remerciements

Les auteurs aimeraient remercier les nombreux collaborateurs du Réseau, ainsi que les assistants de recherche qui ont assurés sa bonne marche durant toutes ces années, dont Patrick Cliche et Patrick Ménard, Université de Sherbrooke; Jim Freemantle, York University; et Ihab Abdou, Service météorologique canadien.

Aérosols et climat : le débat refait surface en cette année record 2024

Les aérosols, ces microparticules liquides ou solides en suspension dans l'air, constituent une source de pollution qui affecte la qualité de l'air que l'on respire. Les aérosols sont aussi au cœur des débats actuels sur l'incertitude de leur rôle dans les changements climatiques. Selon leur nature (Fig. 1), les aérosols ont plusieurs effets sur le climat qui s'opposent : un effet direct sur la baisse de température par un effet « d'écran » au rayonnement solaire dans la haute atmosphère, et un effet indirect de réchauffement de l'atmosphère la nuit en favorisant la formation de nuages bas, mais ces nuages réfléchissent aussi la lumière le jour ! L'effet optique direct dépend aussi de la taille des aérosols : les petits, submicroniques, diffusent alors que les gros absorbent la lumière. Globalement, les effets combinés des aérosols compensent actuellement environ le tiers du réchauffement dû aux gaz à effet de serre, mais cette compensation diminuant depuis les années 1980 accélère le réchauffement (Fig. E1).

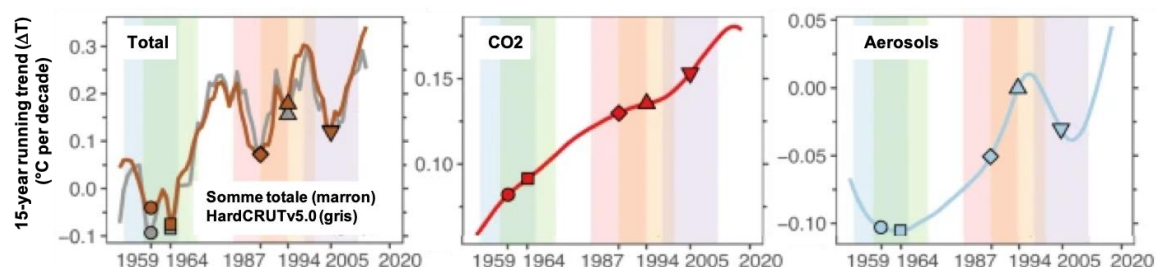


Fig. E1 Tendances moyennées par tranches de 15 ans (couleurs) des différences de température (ΔT , °C par décennie) dues aux causes anthropiques et naturelles totales (à gauche), au dioxyde de carbone CO_2 (au centre) et aux aérosols (à droite), entre les années 1952 et 2020. L'évolution de la somme totale simulée par modèle correspond bien à celle observée (données HardCRUv5.0). Les aérosols atténuent le réchauffement depuis les années 1980 (Tiré de Su et al., 2024, Nature, doi.org/10.1038/s43247-024-01723-x).

Cette question de l'impact des aérosols a récemment refait surface avec le record de chaleur extrême que l'on connaît actuellement. L'année 2024 est en passe d'être la plus chaude jamais observée, devant 2023 et, en plus, elle s'avère la première pour laquelle le réchauffement dépasse de 1,5 °C la période préindustrielle, le seuil de l'accord de Paris considéré comme critique.

Cependant, la cause de ce record ne fait pas consensus. Tout le monde s'accorde derrière l'Organisation météorologique mondiale ⁽¹⁾ à reconnaître que cette flambée de température due à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liée aux activités humaines, en particulier la combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz), a été favorisée par un épisode El Niño exceptionnel, fin 2023 - début 2024. Cependant, plusieurs chercheurs s'interrogent sur le fait qu'El Niño puisse expliquer ce record extrême à lui tout seul!

Une étude, publiée dans *Science* le 5 décembre 2024⁽²⁾, pointe les aérosols, en baisse notamment à cause des nouvelles normes d'émission plus sévères dans le transport maritime depuis janvier 2020 ⁽³⁾. Mais elle questionne aussi l'hypothèse, plus inquiétante, du changement climatique lui-même qui réduirait le nombre de nuages bas. Cet effet s'ajouterait à la baisse de l'albédo de la surface du globe, c'est-à-dire le pourcentage de rayonnement solaire réfléchi vers l'espace, dû à la baisse des banquises polaires, au Nord et au Sud, due au réchauffement global. Ces arguments sont réfutés par d'autres analyses récentes. L'une d'elles ⁽⁴⁾ rappelle que la baisse d'albédo sur les pôles est bien intégrée dans les modèles et démontre qu'El Niño a déjà montré dans le passé de tels sauts de température, comme en 1977, 1998 et 2002.

Encadré (suite)

Une autre étude ⁽⁵⁾ montre que le record actuel peut s'expliquer par un intense pic de variabilité interne au système qui, avec la baisse des aérosols, entraîne une accélération du réchauffement cohérente avec les modèles.

Quoi qu'il en soit, il est encore trop tôt pour conclure, mais chose certaine, les aérosols ont leur mot à dire!

(1) Bulletin de l'OMM sur l'état du climat en 2024

<https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-2024-update-cop29>

(2) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo, 2024

Goessling H.F., Rackow T. and Jung T., *Science*, DOI: 10.1126/science.adq7280

(3) Aerosols: are SO₂ emissions reductions contributing to global warming? 2023

News on the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5), <https://atmosphere.copernicus.eu>

(4) The 2023 global warming spike was driven by the El Niño–Southern Oscillation, 2024

Raghuraman, S. P., Soden, B., Clement, A., Vecchi, G., Menemenlis, S. and Yang, W., *Atmos. Chem. Phys.*,

<https://doi.org/10.5194/acp-24-11275-2024>.

(5) How extreme were daily global temperatures in 2023 and early 2024? 2024

Cattiaux, J., Ribes, A. and Cariou, E., *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2024GL110531>



Photo : Alain Royer, Patrick Cliche et Norm O'Neill (de gauche à droite) en 1994 devant un radiomètre solaire CIMEL (photo de gauche), les mêmes 30 ans plus tard en 2024 (photo de droite). Patrick Cliche, ingénieur retraité du CARTEL, a contribué significativement au succès du réseau AEROCAN durant toute sa carrière.