

Résumé Le programme international POLARCAT, labellisé par l'Année Polaire Internationale, inclut des activités coordonnées et multidisciplinaires sur les régions polaires. La contribution française au projet POLARCAT se traduit par un programme original de mesures aéroportées des polluants dans le nord de l'Europe et le Groenland. Ce projet est réalisé dans le cadre d'une collaboration avec plusieurs équipes étrangères utilisant des avions de recherche en Arctique. L'avion ATR42 de Météo France, spécialement équipé avec des instruments de mesure *in situ* et de télédétection, a participé à deux campagnes intensives d'observations en 2008 : mars/avril à partir de Kiruna (Laponie suédoise) et à Kangerlussuaq au Groenland en juillet. Les résultats obtenus devraient permettre d'obtenir de nouvelles observations sur le rôle joué par la chimie troposphérique, les aérosols, les nuages et le transport dans les processus qui conduisent au changement climatique en Arctique, lequel s'avère être le plus rapide des différentes régions du globe.

Abstract The international POLARCAT is an activity endorsed as part of the International Polar Year (IPY) which includes an intense, internationally coordinated campaign of research initiating a new era in multi-disciplinary research of polar regions. The French contribution to POLARCAT objectives consists to make a serie of unique aircraft measurements on tropospheric pollutants in northern Europe, Greenland and Russia. This project offers the opportunity of a strong collaboration with many international groups also involved in making measurements with other aircraft and data analysis in POLARCAT. The ATR42 aircraft from Météo-France, specially equipped with state-of-art instruments for in-situ and remote sensing measurements, was operated during two intensive field campaigns in 2008 : March/April from Kiruna (Swedish Lapland) and from Kangerlussuaq (Greenland) in July. The expected results should give new insights on the role played by tropospheric chemistry, aerosols, clouds and transport pathways on processes which lead to the dramatic change in the Arctic climate.

L'Arctique sous surveillance : le projet POLARCAT

GAYET Jean – François,
SCHWARZENBOECK Alfons
- Laboratoire de Météorologie Physique (UMR 6016 CNRS/ Université Blaise Pascal)

LAW Kathy, PELON Jacques
et ANCELLET Gérard
- Service d'Aéronomie (UMR 7620 CNRS/ Université Pierre et Marie Curie)



... Il est urgent d'agir

L'Arctique est la région du globe qui connaît le réchauffement le plus rapide observé ces dernières décennies. La fonte rapide de la banquise et les apports d'eau douce dans l'océan dus à l'augmentation du débit des rivières et des précipitations semblent avoir déjà modifié l'océan Arctique et l'océan profond de l'Atlantique Nord. Les précipitations ne semblent pas avoir diminué au Groenland, mais des modifications sensibles de la couverture spatiale et des propriétés des nuages sont possibles, notamment en lien avec les apports de polluants anthropiques. L'Arctique est donc une région où il est urgent d'obtenir une meilleure compréhension des processus qui conduisent au changement climatique. Si certains de ces processus sont liés à l'augmentation globale des gaz à effet de serre, d'autres sont spécifiques à l'Arctique. Le programme POLARCAT (Polar Study using Aircraft, Remote Sensing, Surface Measurements and Models, of Climate, Chemistry, Aerosols and Transport) a pour objectif d'obtenir de nouvelles observations sur le rôle joué par la chimie troposphérique, les aérosols, les nuages et le transport dans ces processus.

Le programme international POLARCAT, labellisé par l'Année Polaire Internationale (API), inclut des activités coordonnées et multidisciplinaires sur les régions polaires. L'activité POLARCAT associe des chercheurs de 18 pays et regroupe des observations à partir de différentes plateformes (avion, ballon, station sol, satellite), des analyses de données et des modélisations numériques pour quantifier le transport des composés chimiques, des aérosols et des métaux lourds vers l'Arctique.

La contribution française au projet POLARCAT se traduit par un programme original de mesures aéroportées des polluants dans le nord de l'Europe, le Groenland et la Russie. Il est coordonné par le Service d'Aéronomie (SA) avec la participation du Laboratoire de Météorologie Physique (LAMP) et du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE). Ce projet offre le cadre d'une collaboration étroite avec plusieurs équipes étrangères utilisant des avions de recherche en Arctique. L'avion ATR42 de Météo France mis en œuvre par SAFIRE (service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement) et spécialement équipé avec des instruments de mesure *in situ* et de télédétection (Figure 1) a participé à deux campagnes intensives d'observations en mars/avril dernier à partir de Kiruna (Laponie suédoise) et à Kangerlussuaq sur la côte Ouest du Groenland en juillet.

Nous allons développer les principaux thèmes abordés dans POLARCAT avec quelques exemples de résultats obtenus.

Figure 1 (photo en bas à gauche). L'avion ATR42 de Météo France. On remarque sous les ailes et autour du fuselage différents instruments pour la mesure *in situ* des paramètres microphysiques et optiques des nuages.

... Sur l'importance du transport des polluants

On a longtemps pensé que la troposphère arctique était extrêmement propre, jusqu'à ce que des pilotes découvrent dans les années 50 une brume étrange au-dessus de l'Arctique, qui diminuait fortement la visibilité. Cette «brume arctique» est un phénomène récurrent observé à la fin de l'hiver et au printemps. Elle est due au transport à longue distance de polluants d'origine anthropique, en provenance principalement d'Europe et d'Asie occidentale, dont l'impact sur le changement climatique est encore mal connu. En été, en raison de la circulation atmosphérique, les régions arctiques sont plutôt soumises à des épisodes de pollution liés aux feux de forêt boréale au Canada et au nord des Etats-Unis. Le rôle des nombreux processus mis en jeu lors de ces épisodes reste donc à déterminer, avec par exemple, le dépôt de carbone-suie sur la glace qui peut changer l'albédo de surface et ainsi conduire à un réchauffement plus rapide en Arctique.

Au cours des deux campagnes d'observations intensives en mars/avril à partir de Kiruna (Laponie suédoise) et à Kangerlussuaq au Groenland en juillet, l'objectif était d'étudier le transport jusqu'en Arctique des aérosols et des espèces traces et, plus généralement, de la pollution due aux sources anthropiques et aux incendies de forêts boréales, de préciser les variabilités saisonnières et annuelles ainsi que l'impact de cette pollution sur la composition de l'atmosphère et sur l'évolution du climat dans cette région. La stratégie expérimentale a consisté à opérer sur l'avion ATR42 des lidars qui permettent de restituer les profils verticaux d'ozone et les couches d'aérosols au dessus et/ou au dessous de l'avion ainsi qu'un ensemble d'instruments pour la caractérisation *in situ* des propriétés physico-chimiques des aérosols. Les objectifs visés ont été atteints en majorité lors de ces vols, à l'exception des observations de la brume arctique, située trop au nord.

... Les interactions avec les nuages

Les nuages jouent un rôle déterminant dans le bilan radiatif de la planète. Selon leurs propriétés, ils peuvent avoir un effet régulateur ou amplificateur sur le forçage radiatif. Or, leurs propriétés dépendent en partie des caractéristiques physico-chimiques des aérosols qui jouent le rôle de noyaux de condensation (CCN) et/ou de noyaux glaçogènes (IN). Cette interaction constitue l'effet indirect des aérosols. En région arctique, la composition physico-chimique des aérosols est peu documentée et la connaissance sur les processus qui président à la formation de la glace est ambiguë : (i) Les processus de nucléation de la glace demeurent une question majeure non résolue et (ii) l'influence anthropique sur les mécanismes de formation des nuages est difficile à quantifier. Une innovation déterminante dans POLARCAT, et qui devrait aider à répondre aux questions ci-dessus, est l'instrument CVI (Counterflow Virtual Impactor) installé sur l'ATR42. Cet instrument permet l'échantillonnage des particules nuageuses (gouttelettes d'eau et/ou cristaux de glace) puis l'évaporation de celles-ci.

Un système d'analyse procède ensuite à la caractérisation physico-chimique de l'aérosol résiduel qui a effectivement servi de CCN et/ou d'IN. Cette information est obtenue simultanément avec celle qui documente les propriétés microphysiques et optiques des particules de nuage à partir d'instruments *in situ* et permet ainsi de caractériser l'interaction 'aérosol-nuage'.

L'interaction 'nuage-rayonnement' également étudiée dans POLACAT a pour objet de valider un modèle numérique pour décrire les propriétés de diffusion des particules de nuages non sphériques (cristaux de glace). Ces propriétés sont indispensables pour valider les algorithmes d'inversion des observations de télédétection spatiale (CALIPSO, CloudSat ...) et aéroportée et ainsi mieux déterminer le bilan radiatif des nuages à différentes échelles. La stratégie expérimentale dans POLARCAT consiste à utiliser deux instruments (le Néphélomètre Polaire et l'Imageur de Particules, CPI) qui permettent la mesure directe des propriétés de diffusion des particules de nuage ainsi que leurs caractéristiques morphologiques (cristaux de glace).

... L'impact des feux de forêt en région boréale sur les aérosols et la chimie

Au cours de l'été, la pollution en région arctique est dominée par les émissions dues aux feux de forêt boréale (Canada, Nord des Etats-Unis, Sibérie) plutôt que par des émissions d'origine anthropique (combustion d'énergie fossile). Les émissions de quantités considérables de fumées et de gaz trace peuvent être soumises à des transports verticaux et horizontaux sur de très grandes distances (trans-continentales). Le dépôt de ces substances, tels les aérosols de carbone-suie, peut réduire de façon significative l'albédo de la neige et de la glace et accélérer la fonte des glaciers arctiques et de la glace de mer. Cependant il n'y a pas actuellement d'observation détaillée pour quantifier ces hypothèses. De même, le rôle sur le bilan radiatif des nuages de type stratus très étendus, caractéristiques en été arctique, est peu documenté.

Par ailleurs, les aérosols issus des fumées de feux de forêt peuvent réduire de façon significative la réflectivité aux courtes longueurs d'onde (visible) au dessus de surfaces enneigées, avec pour conséquence un effet potentiellement important sur le bilan radiatif dans les régions arctiques. Là encore il n'existe que très peu d'observations dans la troposphère arctique pour conforter ces hypothèses. En raison de leur relative proximité des régions arctiques, de l'intensité de leurs sources et des différents processus mis en œuvre, les feux de forêt boréales constituent un des objectifs prioritaires dans POLARCAT. La stratégie expérimentale est similaire avec celle décrite au § 2 avec, à côté de l'ATR42, la mise en œuvre de l'avion Falcon du DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) également basé à Kangerlussuaq et de l'avion DC8 de la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

... Quelques exemples de résultats de la campagne de printemps à Kiruna

La campagne d'été étant en cours de réalisation au moment d'écrire ces lignes, nous donnons ci-dessous quelques exemples de résultats obtenus lors de la campagne de printemps à Kiruna. Au cours de cette campagne, 12 vols de mesures ont été réalisés du 30 mars au 11 avril avec environ 37 heures de vol scientifique. D'une façon générale, les conditions météorologiques ont été favorables pour atteindre les différents objectifs scientifiques. En début de période, les masses d'air échantillonnées au nord de Tromsø se sont avérées très peu polluées puis, à partir du 3 avril des couches d'aérosol à moyenne altitude (entre 3000 et 4500 m) ont été mises en évidence.

Nous présentons ci-dessous les observations obtenues lors de vol du 11 avril. La Figure 2 représente l'image du satellite AVHRR/NOAA dans le visible à 13h:34 TU. La trajectoire de l'avion est indiquée en rouge. Le transect vers le nord a été réalisé à une altitude comprise entre 3000 m et 5500 m avec des mesures de télédétection orientée au nadir puis le transect retour s'est effectué dans la couche limite pour échantillonner la couche nuageuse (clairement visible sur l'image satellite). La Figure 3 illustre le profil de rétrodiffusion atténué obtenu au nadir avec le Lidar LNG (Lidar Nouvelle Génération) à 532 nm de longueur d'onde. Le profil est relatif au transect réalisé vers le nord et couvre les latitudes comprises entre 68°N et 72.7°N. L'altitude de l'avion est matérialisée par la limite des observations lidar disponibles. L'examen du profil de rétrodiffusion montre clairement plusieurs couches stratifiées d'aérosols entre 3000 m et 5000 m environ. L'analyse des résultats du modèle FLEXPART (modèle Lagrangien de dispersion des particules et d'espèces chimiques) pour la prévision de différents traceurs de pollution (dont les aérosols) a montré que des feux de biomasse en Asie étaient à l'origine des couches d'aérosols détectées le 11 Avril.

Les couches d'aérosols sont confirmées de façon remarquable par les mesures *in situ* réalisées au cours des sondages verticaux dans la couche polluée comme l'indique le profil reporté sur la Figure 3. Il s'agit de la concentration d'aérosols de diamètre supérieur à 11 nm mesurée par un des compteurs du système d'analyse. Cette information est directement comparable au signal de rétrodiffusion lidar et va permettre de valider les paramètres d'inversion en termes d'extinction et d'épaisseur optique connaissant la composition physico-chimique des aérosols également déterminée au moyen du système d'analyse *in situ* (en cours).

La deuxième partie du vol (transect retour) a été réalisée dans la couche limite nuageuse dont le profil de rétrodiffusion lidar donne la variabilité (Figure 3). Les Figures 4 a, b, c et d illustrent les profils du facteur d'assymétrie (distinction de la phase liquide et/ou glacée des particules de nuage), du contenu en eau liquide, de la concentration de cristaux de glace et du diamètre effectif des gouttelettes.

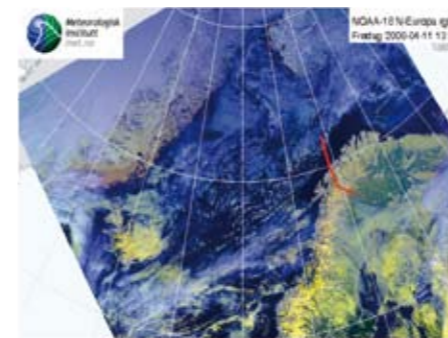


Figure 2. Image dans le canal visible prise par le satellite NOAA/AVHRR le 11 avril 2008 à 13 h:34 TU. La trajectoire de l'avion est indiquée en rouge.

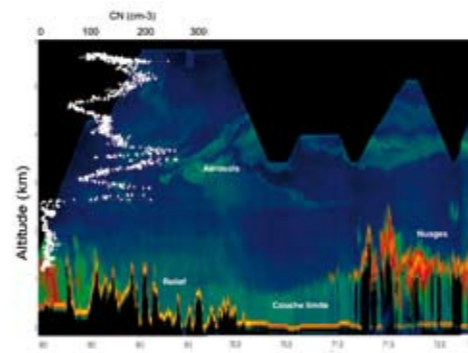


Figure 3. Profil de rétrodiffusion atténué mesuré à 532 nm de longueur d'onde par l'instrument LNG (Lidar de Nouvelle Génération) et profil vertical de la concentration d'aérosols ($D > 11$ nm). Voir texte pour les explications.

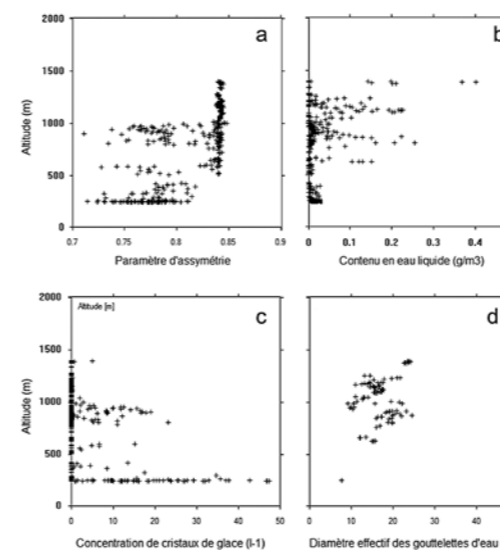


Figure 4. Profils verticaux des propriétés microphysiques obtenus dans le stratocumulus de couche limite le 11 avril 2008.

a - Facteur d'assymétrie, b - Contenu en eau liquide, c - Concentration de cristaux de glace et d - Diamètre effectif des gouttelettes de nuage.

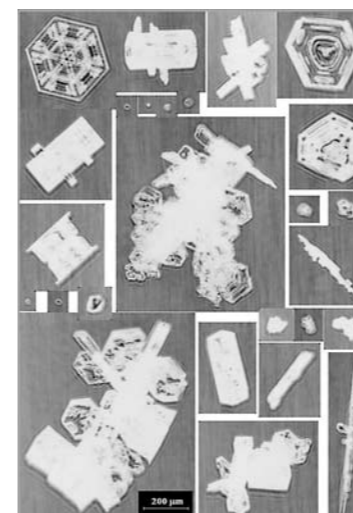


Figure 5. Exemple de cristaux de glace échantillonnés avec l'imageur de particules CPI. La résolution du pixel de l'image est de 2,3 μ m ce qui permet d'analyser avec précision la forme et la structure interne du cristal de glace ; paramètres déterminants dans l'interaction avec le rayonnement. Les exemples sur la figure 5 illustrent la variété importante de types de cristaux de glace (plaquettes hexagonales, colonnes, aiguilles, agrégats) qui caractérise les précipitations issues du stratocumulus de couche limite le 11 avril.

L'analyse des résultats montre que le nuage est en phase mixte (l'eau et la glace coexistent) avec une couche d'eau liquide située au sommet du nuage (le coefficient d'assymétrie (g) est supérieur à 0.8). Le contenu en eau liquide près du sommet atteint 0.4 g/m^3 et le diamètre effectif des gouttelettes varie entre 10 et 20 μ m. Cette caractéristique est corroborée par le profil lidar qui révèle une très forte rétrodiffusion près du sommet situé vers -15°C. Les cristaux de glace sont détectés à partir de 1000 m environ ($g \approx 0.8$ avec une concentration maximale de 50 l-1) et précipitent jusqu'à la surface. Quelques exemples d'échantillonnage de cristaux de glace sont illustrés sur la Figure 5.

Ces observations *in situ* vont permettre de valider les paramétrisations utilisées pour calculer les réflectivités issues du radar RASTA également embarqué sur l'ATR42 (non montrées dans cet article) et mieux restituer les propriétés microphysiques des nuages par télédétection active. Cet exemple confirme l'efficacité des nuages arctiques de couche limite à produire des précipitations sous forme de glace. L'analyse physico-chimique des aérosols résiduels mesurés pendant la séquence en nuage devrait permettre d'identifier les processus qui conduisent à la formation de la glace.

... Conclusions

La phase expérimentale du projet POLARCAT se termine avec une quantité considérable de nouvelles observations et issues, non seulement de notre participation, mais aussi des différents groupes de recherche qui ont contribué à ce projet. L'interprétation de toutes ces observations constitue la deuxième étape du projet. En particulier, un modèle photochimique Lagrangien et un modèle de chimie-transport (LMDz-INCA) permettront l'analyse des observations et l'identification des processus (composition, transport, rétroactions chimie-climat). Pour analyser les interactions nuage-aérosol (rétroaction sur la dynamique, effet indirect), un modèle spectral de la microphysique des nuages et des modules dérivés des paramétrisations des modèles méso-échelle seront utilisés conjointement.

REMERCIEMENTS,

Le projet POLARCAT est soutenu par l'ANR, le CNES, l'INSU (programme LEFFE) et l'IPEV. Les campagnes d'observations n'auraient pu être réalisées sans le dévouement et la compétence des différentes équipes sur le terrain (pilotes, ingénieurs et techniciens).

REFERENCES,

→ 2007 : Arctic Air Pollution : origins and impacts. Law, K.S., and Stohl, A. Sciences (Section spéciale Année Polaire Internationale).