

---

***CONCLUSION GENERALE***

Ce travail s'est inséré dans le cadre du programme européen TAGGSI. Ce programme a eu pour objectif principal d'améliorer la compréhension des facteurs conditionnant l'établissement des concentrations dans les neiges récentes du Groenland. Le but final est de permettre à terme une meilleure interprétation des paléodonnées. C'est dans cette optique que les campagnes relatives à ce programme se sont déroulées à Summit sur le site de forage GRIP/GISP. Pour notre part, nous nous sommes consacrés plus particulièrement à l'étude des facteurs influant sur la saisonnalité de l'aérosol minéral archivé dans les neiges. Ainsi, nous avons pu envisager l'influence de la source et du transport par l'identification de la source géographique de l'aérosol pour différentes saisons. Nous avons ensuite tenté d'évaluer le rôle de l'abattement sur la saisonnalité. Pour ce faire, une détermination de la taille des particules et une estimation de la nature de leur surface a été menée.

Cette étude est principalement axée sur l'étude de deux puits (ATM 91 et ATM 92) collectés à quelques kilomètres de distance et possédant une année de dépôt en commun. En se basant sur l'absence de variabilité spatiale sur cette distance à Summit, ces deux puits ont été superposés en suivant la chronologie de leur dépôt. Ceci nous a permis de reconstruire un puits unique couvrant 4 années de neiges accumulées et assurant ainsi une bonne représentativité des variations saisonnières observées. La datation du puits s'est effectuée sans ambiguïté sur la base du maximum observé pour certaines espèces chimiques traceur des saisons. Ainsi du printemps 1987 au printemps 1991, les maxima en aluminium et en sulfate ont été associés aux couches de printemps, les maxima en  $H_2O_2$  à l'été et les maxima en sodium soluble à l'hiver.

Les concentrations en aluminium dans le matériel particulaire incorporé augmentent d'un facteur 10 au printemps. Or, le tassement des couches de neige en fonction de la profondeur conduit à un lissage du signal ne permettant plus de distinguer les années à partir d'une certaine profondeur. Dans ce cas, on peut imaginer que l'interprétation du signal archivé en terme de variations de l'atmosphère n'est effectivement associé qu'au printemps et ne permet pas de refléter l'état de l'atmosphère pendant les 9 mois restants. Par conséquent, il est nécessaire de s'interroger sur l'origine de ce pic saisonnier en aluminium. Les différents facteurs incluant les sources, le transport et l'abattement ont donc été envisagés.

En dépit de la connaissance des sources et des processus de transport de l'aérosol minéral impliqués dans les épisodes de l'Arctic Haze, la différence de saisonnalité d'apparition de ce phénomène sur les différents sites de la calotte rend nécessaire une étude spécifique des sources et du transport à Summit. En revanche, sachant que le dépôt humide est le processus dominant à Summit, l'étude de l'influence de l'abattement a pu être réduite à l'étude des particules nucléées aux cours d'un événement neigeux. Plus particulièrement, l'évolution de facteurs caractéristiques comme la taille ou la nature de la surface des particules est en mesure de traduire une variation saisonnière de l'abattement.

La détermination des coefficients d'abattement déduite de l'étude de couples d'aérosols et de neiges fraîches collectés pendant l'été, indique une similarité de comportement entre les éléments de l'aérosol minéral. Ceci souligne leur association au sein de mêmes particules, confirmée par la forte corrélation entre l'aluminium et les autres éléments minéraux. Cependant, ces éléments peuvent être associés à des particules terrigènes mais également anthropiques puisque les particules de combustion issues de centrales thermiques à charbon possèdent une signature chimique similaire. Afin d'identifier l'origine du matériel minéral présent, une analyse du rapport Si/Al dans les neiges a été effectuée. La valeur élevée, obtenue sur l'ensemble du puits est compatible avec les valeurs relevées pour les aérosols terrigènes provenant d'un transport longue distance. En revanche, elle semble exclure l'influence d'une source anthropique de combustion industrielle.

Afin de conforter ces premiers résultats, une analyse individuelle des particules, effectuée sur 2 échantillons correspondant à une couche de printemps (1990 et 1991) et 2 échantillons correspondant à une couche d'hiver (1989-1990 et 1990-1991) a été menée. Cette analyse statistique menée par Microscopie Electronique à Transmission, associée à un système de micro-analyse chimique, a permis l'identification des différentes particules. L'abondance relative de celles-ci indique une très large prédominance des espèces terrigènes. En outre, des traceurs comme les verres volcaniques, probablement d'origine islandaise, ou les diatomées d'origine continentale ont été identifiés sur tous les échantillons.

Afin de localiser la source géographique de l'aérosol terrigène atteignant Summit, l'ensemble des régions arides et semi-arides de l'hémisphère nord a été considéré. Cependant,

compte tenu des trajectographies de masses d'air à 10 jours sur Summit, les déserts américains et de l'Est de l'Asie semblent être les régions-source les plus probables. Cette dernière région-source des dépôts dans les neiges récentes de Summit a été identifiée par certains auteurs à l'aide de plusieurs traceurs. N'ayant accès qu'à la composition minéralogique, nous avons confirmé la source asiatique pour les échantillons de notre puits. En effet, ces derniers présentaient une composition similaire sur toutes les saisons, riche en muscovite-illite, pauvre en smectite et en plagioclases et avec un rapport kaolinite/chlorite faible. Les caractéristiques de cette composition sont fortement compatibles avec une source asiatique.

L'utilisation de rapports interélémentaires comme Mg/Al et Ti/Fe nous a permis de distinguer plus précisément l'origine des particules incorporées dans les neiges de Summit parmi les 3 principales zones sources de poussières situées en Asie. Par ailleurs, l'aspect conservatif de ces rapports au cours de l'archivage des particules de l'aérosol minéral a été vérifié. La confrontation des valeurs obtenues pour les échantillons du puits ATM 9192 avec les données de la littérature indique comme origine probable, la région des loess du plateau central de Chine. Cette localisation est mise en évidence pour tous les échantillons du puits ATM 9192 indiquant l'absence d'une variation saisonnière de l'origine des particules. Dans cette zone, l'intensité des émissions est saisonnière, caractérisée par un pic au printemps, ce qui pourrait suggérer la prédominance du facteur source sur la saisonnalité de l'aérosol dans les neiges par rapport à des modifications saisonnières de la circulation atmosphérique qui pourraient conduire à un changement de localisation des sources.

Comme l'efficacité de l'abattement des particules terrigènes est liée à la concentration en noyaux de nucléation dans le nuage précipitant, l'évolution de la taille des particules de l'aérosol a été suivie. Ceci nécessite l'étude de la variation granulométrique de l'aérosol atmosphérique au cours des saisons. Malheureusement, une telle collecte n'a été réalisée que pendant l'été. Pendant cette saison, l'analyse d'un échantillon d'aérosol et de neige fraîche indique une distribution monomodale similaire dans les deux phases avec un diamètre médian en nombre compris entre 0.2-0.3  $\mu\text{m}$ . Ceci suggère que la distribution granulométrique des particules terrigènes n'est pas affectée par les phénomènes de nucléation du moins pendant cette saison. Cette distribution déduite de notre protocole de comptage a été validée par la conversion en distribution granulométrique en masse pour les échantillons de printemps. Le

diamètre médian est compris entre 2 et 3 µm en accord avec un apport longue distance. Ceci est confirmé pour l'ensemble des échantillons du puits qui présentent la même distribution quelque soit la saison. Cette uniformité de la distribution granulométrique en nombre semble exclure l'influence de la taille sur un abattement préférentiel au printemps.

Enfin, nous avons tenté de relier l'efficacité du dépôt des particules terrigènes à la nature chimique de leur couche de surface. En effet, en raison des nombreuses contraintes physiques et chimiques expérimentées par la particule au cours du transport, cette dernière peut subir une mise en solution partielle conduisant les éléments majoritaires de la matrice minérale à former des sels insolubles d'aluminium et probablement de fer, contrôlant leur solubilité. A la différence du sodium crustal, la fraction soluble en aluminium le long du puits reste effectivement constante, en dépit de la forte variabilité de la fraction insoluble suggérant ainsi l'existence d'un facteur limitant associé à un complexe insoluble. Bien que ne connaissant pas la contribution des différentes formes redox du fer, la similarité de la distribution soluble/insoluble, obtenue entre l'aluminium et le fer, suppose également un contrôle thermodynamique avec un complexe insoluble. Cependant, l'étude du fer nécessitait la mesure de cet élément sous ses deux degrés d'oxydation, information qui ne nous était pas accessible dans le cadre de cette étude.

L'identification des phases insolubles de l'aluminium dépend de la valeur du pH. Ce paramètre a été mesuré dans un premier temps dans nos échantillons de neige, après fusion hors CO<sub>2</sub> au laboratoire. Il s'est révélé constant sur l'ensemble des échantillons du puits restant compris entre 5.1 et 5.7. Cette approche n'est cependant pas satisfaisante puisque la composition de la neige fondu ne reflète pas nécessairement celle des nuages dans lesquels la nucléation s'opère. Pour y remédier nous avons envisagé plusieurs approches. Nous avons tout d'abord considéré que les brouillards étaient plus représentatifs des gouttelettes en surfusion présentes dans le nuage compte tenu de l'altitude du site. Selon le type de collecteur de brouillard utilisé, les valeurs estimées dans ce cas sont inférieures de 0.2 à 0.5 unité de pH par rapport à celles mesurées hors CO<sub>2</sub> dans nos échantillons de neige fondu. Afin de tenter de s'affranchir des éventuels artefacts de mesure liés aux collecteurs, nous avons adopté une méthode de calcul basée sur l'efficacité d'abattement de l'aérosol atmosphérique par le brouillard. Le calcul effectué indique que l'on peut envisager pour les ions sulfates, un facteur

pouvant être 100 fois plus élevé que celui mesuré. Dans ce cas, le pH serait inférieur de 2 unités à celui mesuré dans les neiges fondues. Ces différentes estimations conduisent finalement à prendre en compte une gamme de pH comprise approximativement entre 3 et 5. Dans ces conditions et en se référant plus précisément au modèle de spéciation développé pour l'aluminium, il est difficile d'identifier la nature du sel de surface. En revanche, on peut admettre que l'absence de saisonnalité pour les valeurs du pH mesurées dans les neiges est conservée pour les gouttelettes du nuage. Par conséquent, en supposant que la fréquence des précipitations pendant le transport diffère peu entre les saisons, l'abattement n'apparaît pas comme un facteur prépondérant sur la saisonnalité de l'aérosol minéral archivé dans les neiges. Ceci semblerait donc suggérer la prédominance de la source sur la saisonnalité des particules minérales collectées dans les neiges récentes de Summit.

Cette étude souffre néanmoins de l'absence de données complémentaires. Tout d'abord, il n'a pas été possible pour des raisons logistiques d'acquérir un prélèvement de l'aérosol atmosphérique sur l'ensemble de l'année. Un prélèvement mieux ajusté entre les aérosols et les neiges fraîches et une extension de ces mesures aux campagnes hivernales permettrait notamment de confirmer avec plus de certitude l'influence de la taille des particules sur l'abattement. D'autre part, l'estimation de la composition des gouttelettes en surfusion ne peut pratiquement s'effectuer sur ce site que par la collecte des gouttelettes de brouillard. Ceci nécessite d'abord une intercalibration entre les différents types de collecteur. Ensuite, une meilleure connaissance de la fréquence des brouillards, du contenu en eau, de la taille des gouttelettes et l'influence de la solubilité de gaz acide sur la composition de ces gouttelettes est nécessaire.

Enfin, l'étude de l'altération de l'aérosol minéral au cours du transport demande également à être approfondie. En particulier, la contribution en fer ferreux doit être déterminée par un protocole de collecte et de séparation, adapté aux différents degrés d'oxydation du fer. D'un point de vue plus général et en s'écartant des objectifs du travail présenté dans cette thèse, l'étude de la fraction soluble des éléments terrigènes au cours du transport permet de mettre en évidence l'existence d'une altération de surface, sous la forme de complexes insolubles de fer ou d'aluminium. Ces sels sont susceptibles d'agir de façon significative sur le bilan radiatif des particules d'une part par un effet direct en modifiant leurs propriétés

d'absorption et de diffusion de la lumière et d'autre part indirectement en modifiant leurs propriétés nucléatives. Ainsi, une généralisation de ce type d'étude pour les particules présentes dans les panaches d'aérosols transportés à grande distance contribuerait à une meilleure modélisation de l'influence de ces particules sur le bilan radiatif terrestre.

---

***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

- Andersen, K. and C. Genton, Modeling the present and last glacial maximum transportation of dust to the arctic with an extended source sheme, In 'The impact of desert Dust across the Mediterranean', S. Guerzoni and R. Chester (eds), 123-132, 1996.
- Andreae, M.O., R.J., Charlson, F., Brunynnseels, H., Storms, R., Grieken and W., Maenhaut, Internal mixture of sea salt, silicates and excess sulphate in marine aerosols, *Science*, 232, 1620-1623, 1986.
- Anklin, M. and B. Stauffer, Pattern of annual snow accumulation along a west greenland flow line: no significant change observed during recent decades, *Tellus*, 46B, 294-303, 1994.
- Arimoto, R., B.J. Ray, N.F. Lewis and U.Tomza, Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean, *Journal of Geophysical Research*, 102, 13, 15,867-15,874, 1997.
- Barrie, L.A., R.M., Hoff and S.M., Daggupaty, The influence of mid-latitudinal pollution sources on haze in the Canadian Arctic, *Atmospheric Environment*, 20, 643-663, 1981.
- Barrie, L.A. and R.M. Hoff, Five years of air chemistry observations in the Canadian Arctic, *Atmospheric Environment*, 19, 899-904, 1985.
- Barrie, L. A., Arctic air pollution: An overview of current knowledge, *Atmospheric Environment*, 20, 4, 643-663, 1986.
- Barrie, L. A., M. P. Olson and K. K. Oikawa, The flux of anthropogenic sulphur into the arctic from mid-latitudes in 1979/80, *Atmospheric Environment*, 23, 11, 2505-2512, 1989.
- Barrie, L. A. and M. J. Barrie, Chemical components of lower tropospheric aerosols in the high Arctic: Six years of observations, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 11, 211-226, 1990.
- Barrie, L.A., Snow formation and processes in the atmosphere that influence its chemical composition, In *Seasonal snowpacks*, T.D. Davies (eds), NATO ASI Series, 1-20, 1991.
- Barrie, L. A., Arctic aerosol: composition, sources and tranport, In 'Ice core studies of Global Biogeochemical Cycles', R.J. Delmas (eds), NATO ASI Series, 1-21, 1995.
- Beer, J., R. C. Finkel, G. Bonani, H. Gäggeler, U. Görlach, P. Jacob, D. Klockow, J. C.C. Langway, A. Neftel, H. Oeschger, U. Schotterer, J. Schwander, U. Siegenthaler, M. Sutter, D. Wagenbach and W. Wölfi, Seasonal variations in the concentration of 10 Be, Cl-, NO<sub>3</sub>-, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 210 Pb, <sup>3</sup>H, mineral dust, and d<sup>18</sup> O in Greenland snow., *Atmospheric Environment*, 25A, 4, 899-904, 1991.
- Bergametti, G., AL. Dutot, P. Buat-Ménard, R. Losno and E. Remoudaki, Seasonal variability of the elemental composition of atmospheric aerosol particles over the northwestern Mediterranean, *Tellus*, 41B, 353-361, 1989.
- Bergametti, G., A. Chapuis, C. Devaux, A. Druilhet, J. Fontan, A. Gaudichet, L. Gomes, H. Ide, E. Lamaud, A. Maidouka and A. Tinga, Atmosphere soil exchange of mineral particles in a Sahelian area, In *precipitation scavenging and atmosphere surface exchange*, Schatz S.E. and Slinn W.G. (eds), 2, 909-920, 1992.

Bergin, M.H., JL Jaffrzo, C.I. Davidson, R. Caldow and J. Dibb, Fluxes of chemical species to the Greenland ice sheet at Summit by fog and dry deposition, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 58, 15, 3207-3215, 1994.

Bergin, M. H., C. I. Davidson, J. E. Dibb, J. L. Jaffrezo, H. D. Kuhns and S. Pandis, A simple model to estimate atmospheric concentrations of aerosol chemical species based on snow core chemistry at Summit, Greenland, *Geophysical Research Letters*, 22, 4, 3517-3520, 1995.

Biscaye, P.E., Mineralogy and sedimentation of recent Deep-Sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans, *Geological Society of America Bulletin*, 76, 803-832, 1965.

Biscaye, P.E. and E.J. Dasch, The rubidium, stontium, stontium isotope system in deep sea sediments : Argentine Basin, *Journal of Geophysical Research*, 76, 5087-5096, 1971.

Biscaye, P.E., F.E., Grousset, M., Revel, S., Van der Gaast, G.A., Zielinski, A., Vaars and G., Kukla, Asian provenance of glacial dust (Stage 2) in the GISP2 ice core, Summit, Greenland, *Journal of Geophysical Research*, 102, 26 765-26 781, 1997.

Biscaye, P.E., A.M. Svensson, JP Steffensen, F.E. Grousset, Provenance of atmospheric dust in snow of the past decade at NorthGRIP, Greenland, Abstract, Am. Geophys. Union, Fall Meeting, 1997a.

Blifford, I. H., Jr and D. A. Gillette, Applications of the lognormal frequency distribution to the chemical composition and size distribution of naturally occurring atmospheric aerosols, *Water, Air and Soil Pollution*, 1, 106-114, 1971.

Boettinger, JL and R.J. Southard, Phyllosilicate distribution and origin in Aridisols on a granitic Pediment, Western Mojave desert, *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1189-1198, 1995.

Borys, R.D., P.J. DeMott and E.E. Hindman, The significance of snow crystal and montain surface rimming to the removal of atmospheric trace constituents from cold clouds, *In Precipitation Scavenging, Dry deposition and Resuspension*, H.R. Pruppacher, R.G Semonin and W.G.N. Slinn (eds), 181-189, 1983.

Borys , R.D, E.E. Hindman and P.J. Demott, The chemical fractionation of atmospheric aerosols as a result of snow crystal formation and Growth, *Journal of Atmospheric Chemistry*, Vol 7, 3, 213-239, 1988.

Borys, R.D., D. Del Vecchio, JL Jaffrezo, J. Dibb and D.L. Mitchell, Field observations, measurements and preliminary results from a study of west deposition processes influencing snow and ice chemistry at summit, Greenland, *In Precipitation Scavenging and Atmospheric-Surface Exchange*, Schwartz, S.E and W.G. Slinn (eds), 1705-1718, 1992.

Borys, R. D., D. d. Vecchio, J. L. Jaffrezo, C. I. Davidson and D. L. Mitchell, Assessment of ice particle growth processes at Dye 3, Greenland, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2815-2822, 1993.

Boutron, C. F., U. Gorlach, J.P.Candelone, M. A. Bolshov and R. J. Delmas, Decrease in anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s, *Nature*, 353, 153-156, 1991.

- Bowen, H.J.M, *Trace elements in biochemistry*, Academic Press, 1966.
- Bremond, M.P., H. Cachier and P. Buat-ménard, Particulate carbon in the paris region atmosphere, *Environment Technology Letters*, 10, 339-346, 1989.
- Bresson, M.A., S. Beyne, P. Masclet and G. Mouvier, optimisation des méthodes de prélèvement et d'analyse des hydrocarbures aromatiques polycycliques et de leur dérivés azotés : détermination de leur stabilité dans l'atmosphère, *In Physico-Chemical behaviour of atmospheric pollutants*, G. Restelli nd G. Angeletti (eds), Reidel, Dordrecht, 1984.
- Brewer, P., *Minor elements in seawater*, 2<sup>nd</sup> ed., JP. Riley and G. Skirrow (eds), 1, 415-496, 1975.
- Bridgman, H.A, R.C., Schnell, J.D., Kahl, G.A., Herbert and E., Joranger, A major haze event near point Barrow, Alaska : analysis of probable source regions and transport pathways, *Atmospheric Environment*, 23, 2537-2549, 1989.
- Bridgman, H.A., *Global air pollution : Problems for the 1990s*, John Wiley & Son, 1994
- Buat-Ménard, P., U.Ezat and A. Gaudichet, Size distribution and mineralogy of aluminosilicate dust particles in tropical pacific air and rain, *In Precipitation Scavenging, Dry Deposition and Resuspension*. H.R. Pruppacher, R.G Semonin and W.G.N. Slinn (eds), 1259-1269, 1983.
- Bücher, A., J. Dubief and C. Lucas, Les apports de poussières sahariennes pendant l'été en Europe, *Revue de Géologie Dynamique et Géologie Physique*, 24, 2, 153-165, 1983.
- Cachier, H. and M.H. Pertuisot, particulate carbon in Arctic ice, *Analusis* 22, 34-37, 1994.
- Cachier, H., Combustion carbonaceous aerosols in the atmosphere : implications for ice core studies, *In 'Ice Core Studies of Global Biogeochemical Cycles'*, R.J. Delmas (eds), NATO ASI Serie, I30, 313-345, 1995.
- Cahill, T. A. and R. A. Eldred, Elemental composition of arctic particulate matter, *Geophysical Research Letters*, 11, 5, 413-416, 1984.
- Cahill, T., R. Eldred and P. Feeney, Particulate monitoring and data analysis for the national park service 1982-1985, *National Park Service Contract Number USDICX-0001-3-0056*, William Malm, Project Manager., 1986.
- Candelone, J. P., S. Hong, C. Pellone and C. F. Boutron, Post-Industrial Revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metals as documented in central Greenland snow and ice, *Journal of Geophysical Research*, 100, 8, 16,605-16,616, 1995.
- Candelone, J.P., JL Jaffrezo, S. Hong, C.I. Davidson and C.F. Boutron, Seasonal variations in heavy metals concentrations in present day greenland snow, *Science of the Total Environment*, 193, 101-110, 1996.
- Caquineau, S., A. Gaudichet, L. Gomes, MC Magonthier and B. Chatenet, Saharan dust : Clay ratio as a relevant tracer to assess the origine of soil-derived aerosols, *Geophysical Research Letters*, 25, 7, 983-986, 1998.

- Chang, Y.S., R.L. Arndt and G.R. Carmichael, Mineral base-cation deposition in Asia, *Atmospheric Environment*, 30, 13, 2417-2427, 1996.
- Chiapello, I., Les aérosols atmosphériques au-dessus de l'atlantique nord tropical : approche physico-chimique et météorologique. Evaluation de la contribution des différentes espèces à l'épaisseur optique en aérosol, Thèse de l'Université paris 7, 1996.
- Chiapello I., G. Bergametti, B. Chatenet, P. Bousquet, F. Dulac and E. Santos Suares, Origins of African dust transported over the North-Eastern Tropical Atlantic, *Journal of Geophysical Research*, 102, 13701-13709, 1997.
- Chizhikova, N. P., Y. G. Yevstifeyev and Y. I. Pankova, Mineralogical composition of the clay fraction in desert soils of Mongolia, *Soviet Soil Science*, 21, 67-77, 1989.
- Chou, L. and R. Wollast, Study of the weathering of albite at room temperature and pressure with a fluidized bed reactor, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 48, 2205-2217, 1984.
- Clain, M.P., Etude de la composante organique de l'aérosol atmosphérique, Thèse Université de Savoie, 1995
- Cliff, G. and G.W., Lorimer, The quantitative analysis of thin specimens, *Journal of Microscopy*, 103, 203-207, 1975.
- COHMAP Members, Climatic changes of the last 18 000 years : Observations and model simulations, *Science*, 241, 1043-1052, 1988.
- Colin, J. L., J. L. Jaffrezo and J. M. Gros, Solubility of major species in precipitation: Factors of variation, *Atmospheric Environment*, 24A, 3, 537-544, 1990.
- Colin JL, B. Lim, E.Herms, F. Genet, E.Drab, JL Jaffrezo and CI Davidson, Air to snow mineral transfert : Crustal elements in aerosols, fresh snow and snowpits on the Greenland Ice Sheet, *Atmospheric Environment*, 31, 20, 3395-3406, 1997.
- Collett, J. L., Jr, A. S. H. Prevot, J. Staehelin and A. Waldvogel, Physical factors influencing winter precipitation chemistry, *Environmental Science and Technology*, 25, 4, 782-788, 1991.
- Coudé-Gaussen, G., Le cycle des poussières éoliennes désertiques actuelles et la sédimentation des loess péridesertiques quaternaires, *Bull. Centre Rech. Explor. Product. Elf-Aquitaine*, 8, 167-182, 1984.
- Coudé-Gaussen, G and P. blanc, Présence de grains éolisés de palygorskite dans les poussières actuelles et les sédiments récents d'origine désertique. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1, 571-579, 1985.
- Cunningham, J. and E.D. Waddington, Air flow and dry deposition of non sea salt sulfate in polar firm : paleoclimatic implications, *Atmospheric Environment*, 27A, 2943-2956, 1993.
- D'Almeida, G. A. and L. Schütz, Number, mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the sahara, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 233-243, 1983.

- Dansgaard, W., The oxygen-18 abundance in fresh water, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 6, 241-260, 1954.
- Dasch, E.J., Stontium isotopes in weathering profiles, deep sea sediments and sedimentary rocks, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 33, 1521-1552, 1969.
- Davidson, C. I., S. Santhanam, R. C. Fortmann and M. P. Olson, Atmospheric transport and deposition of trace elements onto the Greenland ice sheet, *Atmospheric Environment*, 19, 12, 2065-2081, 1985.
- Davidson, C. I., R. E. Honrath, J. B. Kadane, R. S. Tsay, P. A. Mayewski, W. B. Lyons and N. Z. Heidam, The scavenging of atmospheric sulfate by arctic snow, *Atmospheric Environment*, 21, 4, 871-882, 1987.
- Davidson, C.I. and Y.L. Wu, Dry deposition of particles of particles and vapors, In 'Acidic Precipitation', S.E. Lindberg, A.L. Page and S.A. Norton (eds), 103-216, 1990.
- Davidson, C. I., J. L. Jaffrezo, M. J. Small, P. W. Summers, M. P. Olson and R. B. Borys, Trajectory analysis of source regions influencing the south greenland ice sheet during the Dye 3 Gas and aerosol Sampling Program, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2739-2749, 1993.
- Davidson, C. I., J. L. Jaffrezo, B. W. Mosher, J. E. Dibb, R. D. Borys, B. A. Bodhaine, R. A. Rasmussen, C. F. Boutron, U. Gorlach, H. Cachier, J. Ducret, J. L. Colin, N. Z. Heidam, K. Kemp and R. Hillamo, Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland- I. Seasonal variations, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2709-2722, 1993a.
- Davidson, C.I., M.H., Bergin and H.D., Kuhns, The deposition of particles and gases to ice sheets, In *Chemical Exchange Between the atmosphere and Polar Snow*, E.W., Wolff and R.C., Bales (eds), NATO ASI Serie, 43, 131-143, 1996.
- DeAngelis, M. and A. Gaudichet, Saharan dust deposition over Mont Blanc (french Alps) during the last 30 years, *Tellus*, 43B, 61-75, 1991.
- DeAngelis, M. and M. Legrand, Origins and variations of fluoride in Greenland precipitation, *Journal of Geophysical Research*, 99, 1, 1157-1172, 1994.
- De Angelis, M. and M. Legrand, Preliminary investigations of post depositional effects on HCl, HNO<sub>3</sub> and organic acids in polar firn layers. In : 'Ice core studies of global biogeochemical cycles' R.Delmas (ed), *NATO ASI Series I*, 361-381, 1995.
- De Angelis, M. JP Steffensen, M. Legrand, H. Clausen and C. hammer, Primary aerosol (sea salt and soil dust) deposited in Greenland ice during the last climatic cycle : Comparison with east Antarctic records, *Journal of Geophysical Research*, 26 , 681-26 698, 1997.
- Desboeufs, K., Contribution à l'étude des processus d'altération de l'aérosol dans le nuage, DEA Université Paris7, 1997.
- Delmas, R., A natural artefact in Greenland ice-core CO<sub>2</sub> measurements, *Tellus*, 45B, 391-396, 1993.

- Dentener, F.J., G.R. Carmichael, Y. Zhang, J. Lelieveld and P.J. Crutzen, Rôle of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere, *Journal of Geophysical Research*, 101, 22 869-22 889, 1996.
- Deer, W.A., R.A. Howie and J.Zusman, *Rock-forming minerals*, ed. Longmans, 1966.
- Dibb, J. E., J. L. Jaffrezo and M. Legrand, Initial findings of recent investigations of air-snow relationship in the summit region of the Greenland ice sheet, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 14, 167-180, 1992.
- Dibb, J. E. and J. L. Jaffrezo, Beryllium-7 and lead-210 in aerosol and snow in the Dye 3 Gas, Aerosol and Snow Sampling Program, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2751-2760, 1993.
- Dibb, J. E., R. W. Talbot, S. I. Whitlow, M. C. Shipham, J. Winterle, J. McConnell and R. Bales, Biomass burning signatures in the atmosphere and snow at Summit, Greenland: An event on 5 August 1994, *Atmospheric Environment*, 30, 4, 553-561, 1996.
- Dixon, R. W., L. Mosimann, B. Oberholzer, J. Staehelin, A. Waldvogel and J. L. C. Jr, The effect of riming on the ion concentrations of winter precipitation. 1. A quantitative analysis of field measurements, *Journal of Geophysical Research*, 100, 6, 11,517-11,527, 1995.
- Dobrovol'skiy, V. V., Geochemistry of soils and vegetation in the Trans-Altai Gobi, *Eurasian Soil Science*, 25, 1-15, 1993.
- Duce, R. A., C. K. Unni, B. J. Ray, J. M. Prospero and J. T. Merrill, Long range transport atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524, 1980.
- Duce, R.A., P.S., Liss, J.T. Merrill, E.L., Atlas, P., Buat-Menard, B.B., Hicks, J.M. Miller, J.M., Prospero, R., Arimoto, T.M., Church, W., Ellis, J.N., Galloway, L., Hansen, T.D., Jickells, A.H., Knap, K.H., Reinhardt, B., Schneider, A., Soudine, J.J., Tokos, S., Tsunogai, R., Wollast and M., Zhou, The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 5, 193-259, 1991.
- Eden, D. N., W. Qizhong, J. L. Hunt and J. S. Whitton, Mineralogical and geochemical trends across the Loess Plateau, North China., *Catena*, 21, 73-90, 1994.
- Eghbal, M. K. and R. J. Southard, Mineralogy of aridisols on dissected alluvial fans, Western Mojave desert, California, *Soil Science Society of the American Journal*, 57, 538-544, 1993.
- Elichegaray, C, A., Dutot, B., Grubis and R., Viè-le-Sage, Dosage par fluorescence-X d'aérosols atmosphériques, *Analisis*, 9, 10, 1981.
- Erickson, D.J., Merrill, J.T. and Duce R.A., Seasonal estimates of global atmosphere sea-salt distributions, *Journal of Geophysical Research*, 91, 1067-1072, 1986.
- Falconer, R.E. and P.D. Falconer, Determination of cloud water acidity at a mountain observatory in the Adirondack Mountains of New York State, *Journal of Geophysical Research*, 85, 7465-7470, 1980.

Fan, X.B., K., Okada, N., Niimura, K., Kai, K., Arao, G.Y., Shi, Y., Qin and Y., Mitsuta, Mineral particles collected in China and Japan during the same asian dust-storm event, *Atmospheric Environment*, 30, 2, 347-351, 1996.

File, R.F., Dust deposits in England on 9 november 1984, *Weather*, 41, 191-195, 1986

Fisher, D.A., Comparison of 105 years of oxygen isotope and insoluble impurity profiles from the Devon Island and Camp century ice cores, *Quaternary Research*, 11, 299-305, 1979.

Fisher, G.L., B.A. Prentice, D. Silberman, J.O. Ondov, A.H. Blermann, R.C Ragaini and A.R McFarland, Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash, *Environmental Science and Technology*, 12, 4, 447-451, 1978.

Fisher, H. and D. Wagenbach, Large-scale spatial trends in recent firn chemistry along an east-west transect through central Greenland, *Atmospheric Environment*, 30, 19, 3227-3238, 1996.

Frye, J.C., H.D. Glass and H.B. Willman, Stratigraphy and mineralogy of the Wisconsinan loess of illinois, *Illinois Geol. Surv. Circ.*, 334, 1-55, 1962.

Fuhrer, K., M. Hutterli and J.R. McConnell, Overview of recent field experiments for the study of the air-snow transfer of  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{HCHO}$ , In : 'Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow' E.W. Wolff and R.C. Bales (ed), NATO ASI Series I, 43, 307-318, 1996.

Fuhrer, K., A. Neftel, M. Anklin, T. Staffelbach and M. Legrand, High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle, *Journal of Geophysical Research*, 101, 2, 4147-4164, 1996

Gatz, D.F., Identification of aerosol sources in the St Louis area using factor analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 17, 5, 600-608, 1978.

Gatz, D.F. and J.M. Prospero, A large silicon-aluminium aerosol plume in central Illinois : North african desert dust ?, *Atmospheric Environment*, 30, 22, 3789-3799, 1996.

Gaudichet, A. and P. Buat-Menard, Nature minéralogique et origine des particules atmosphériques insoluble du Pacifique Tropical Nord (Atoll d'Enewetak). Etude par microscopie électronique en transmission., *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, t. 294, Serie II, 1241-1246, 1982.

Gaudichet, A., J. R. Petit, R. Lefevre and C. Lorius, An investigation by analytical transmission electron microscopy of individual insoluble microparticles from Antarctic (Dome C) ice core samples., *Tellus*, 38B, 250-261, 1986.

Gayley, R. I. and M. Ram, Seasonal variations in diatom abundance and provenance in Greenland ice, *Journal of Glaciology*, 290-292, 1988.

Genthon, C., Simulations of desert dust and sea salt aerosols in Antarctica with a general circulation model of the atmosphere, *Tellus*, 44, 371-389, 1992.

- Gillette, D.A and T.R. Walker, Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of west Texas, *Soil Science*, 123, 97-110, 1977.
- Gillette, D.A., B.A. Bodhaine and D. Mackinnon, transport and deposition of desert dust in the Kafirnigan river valley (Tadzhikistan) from Shaartuz to Esanbay : measurements and a simple model, *Atmospheric Environment*, 27A, 16, 2545-2552, 1993.
- Glaccum, R.A. and J.M. Prospero, Saharan aerosols over the tropical North Atlantic-Mineralogy, *Marine Geology*, 37, 295-321, 1980.
- Goldstein, S.L., R.K. O'Nions and P.J. Hamilton, A Sm-Nd isotopic study of dusts and particulates from major river systems, *Earth Planetary Science Letters*, 70, 221-236, 1984.
- Gomes, L., Bergametti, F., Dulac and U., Ezat, Assessing the actual size distribution of atmospheric aerosols collected with a cascade impactor, *Journal of Aerosol Science*, 21, 1, 47-59, 1990.
- Gomes L., Approche géochimique du soulèvement des aérosols à l'interface sol-atmosphère en zone désertique, Thèse, Université Paris 7, 1990a.
- Gomes, L., G. Bergametti, G. Coudé-Gaussien and P. Rognon, Submicron desert dusts : a sandblasting process, *Journal of Geophysical Research*, 95, 9, 13927-13935, 1990b.
- Gomes, L. and D.A. Gillette, A comparison of characteristics of aerosol from dust storms in central Asia with soil-derived dust from other regions, *Atmospheric Environment*, 27A, 16, 2539-2544, 1993.
- Graham, R.C. and E. Franco-Vizcaino, Soils on igneous and metavolcanic rocks in the Sonoran desert of Baja California, Mexico, *Geoderma*, 54, 1-4, 1-21, 1992.
- Griffin, J.J., H. Windom and E.D. Goldberg, The distribution of clay mineral in the world Ocean, *Deep-Sea Research*, 15, 433-459, 1968.
- GRIP Members, Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core, *Nature*, 364, 203-207, 1993.
- Grousset, F.E. and R. Chesselet, The Holocene sedimentary regime in the northern Mid-Atlantic Ridge region, *Earth and Planetary Science Letters*, 78, 271-287, 1986.
- Grousset, G., C. Latouche and N. Maillet, Clay minerals as indicators of wind and current contribution to post glacial sedimentation on the Azores/Iceland ridge, *Clays and Minerals*, 18, 65-75, 1983.
- Grousset, F.E., P.E. Biscaye, A. Zindler, J. Prospero and R. Chester, Neodymium isotopes as tracers in marine sediments and aerosols : North Atlantic, *Earth and Planetary Science Letters*, 87, 367-378, 1988.
- Grousset, F.E., P.E., Biscaye, M., Revel, J.P., Petit, K., Pye, S., Joussaume, and J. Jouzel, Antarctic ice core dusts at 18ky B.P. : isotopic constraints on origins and atmospheric circulation, *Earth Planetary Science Letters*, 111, 175-182, 1992.

- Hammer, C. U., H. B. Clausen, W. Dansgaard, N. Gundestrup, S. J. Johnsen and N. Reeh, Dating of greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust, *Journal of Glaciology*, 20, 3-26, 1978.
- Hammer, C.U., The influence on atmospheric composition of volcanic eruptions as derived from ice core analysis. *Annals of Glaciology*, 7, 125-129, 1985.
- Han, JM, A preliminary study on the clay mineralogy of the loess at Luochuan section, In *Quaternary Geology and Environment of China*, Liu TS. (eds), 93-100, 1985.
- Hansson, M. E., The renland ice core. A northern hemisphere record of aerosol composition over the 120,000 years, *Tellus*, 46B, 390-418, 1994.
- Hay, R.L., R.E. Pexton, T.T. Teague, T.K. Kyser, Spring-related carbonate rocks, Mg clays, and associated minerals in Pliocene deposits of the Amargosa desert, Nevada and califonia, *Geological Society of America Bulletin*, 97, 1488-1503, 1986.
- Heaton, R.W., K.A. Rahn and D.H. Lowenthal, Regional apportionment of sulfate and tracer elements in Rhode island precipitation, *Atmospheric environment* 26A, 1529-1543, 1992.
- Heidam, N. Z., The components of the arctic aerosol, *Atmospheric Environment*, 18, 2, 329-343, 1984
- Herbert, G.A., J.M., Harris and B.A. Bodhaine, Atmospheric transport during AGASP-II : the alaskan flights (2-10 April 1986), *Atmospheric Environment*, 23, 2521-2535, 1989.
- Hillamo, R. E., V. M. Kerminen, W. Maenhaut, J. L. Jaffrezo, S. Balachandran and C. I. Davidson, Size distributions af atmospheric trace elements at Dye 3, Greenland-I. Distribution characteristics and dry deposition velocities, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2787-2802, 1993.
- Hobbs, P.V., *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, Academic press, Inc., 1993.
- Hoffman, M.R., Possible chemical transformation in snow and ice induced by solar (UV photons) and cosmic irradiation (muons), In : 'Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow' EW. Wolff and R.C. Bales (ed), NATO ASI Series I, 353-377, 1996.
- Hofmann, H., P., Hofmann and K.H., Lieser, Transition metals in atmospheric aqueous samples, analytical determination and speciation, *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 340, 591-597, 1991.
- Hoyau, V., Recherche d'un traceur géochimique dans les neiges du groenland, Thèse de l'université Paris 7, 1997.
- Ishizaka, Y., P. V. Hobbs and L. F. Radke, Arctic hazes in summer over Greenland and the north american arctic: 2: Nature and concentrations of accumulation mode and giant particles, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 9, 149-159, 1989.
- Isono, K., On ice-crystal nuclei and other substances found in snow crystals, *Journal of Meteorology*, 12, 456-462, 1955.

- Ivanov, V.A., M.A. Prokofyev, D.A. Zhukovsky, V.F. Zhvaley, L.S. Ivlev and J.W. Winchester, Chemical and mineralogical investigation of tropospheric aerosol during the USSR-USA experiment « Dune », Dushanbe, Tadzhik SSR, *Special Environmental Report No.17*, WMO-No724, World Meteorological Organisation, Geneva, 100-103, 1989.
- Iversen, T., and E., Joranger, Arctic air pollution and large scale atmospheric flows, *Atmospheric Environment*, 19, 2099-2108, 1985.
- Iversen, T., Atmospheric transport pathways for the Arctic, In *Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow*, E.W., Wolff and R.C., Bales (eds), NATO ASI SerieI, 71-92, 1996.
- Iwasaka, Y., H. Minoura and K. Nagaya, The tranport and spatial scale of Asian dust storm clouds: a case study of the dust storm event of April 1979, *Tellus*, 35 B, 189-196, 1983.
- Jaenicke R., Aerosol physics and chemistry, In *Landolt-Börnstein, New series*, V 4b, G.Fisher (ed.), 391-457, 1985.
- Jaffrezo, JL and JL Colin, Rain-aerosol coupling in urban area : scavenging ratio measurements and identification of some transfer processes, *Atmospheric Environment*, 22, 929-935, 1988.
- Jaffrezo, J. L., R. E. Hillamo, C. I. Davidson and W. Maenhaut, Size distributions of atmospheric trace elements at Dye 3, Greenland-II. sources and transport, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2803-2814, 1993.
- Jaffrezo, J. L., C. I. Davidson, M. Legrand and J. E. Dibb, Sulfate and MSA in the air and snow on the Greenland ice sheet, *Journal of Geophysical Research*, 99, 1, 1241-1253, 1994.
- Jaffrezo, J. L., J. E. Dibb, R. C. Bales and A. Neftel, Current status of atmospheric studies at Summit (Greenland) and implications for future research. In *'Ice Core Studies of Global Biogeochemical Cycles'*, NATO ASI Serie, I30, 427-458, 1995.
- Jickells, T.D., T.D., Davies, M., Tranter, S., Landsberger, K., Jarvis and P., Abraham, Trace elements in snow samples from the Scottish Highlands : sources and dissolved/particulate distributions, *Atmospheric environment*, 26 A, 393-401, 1992 .
- Johnsen, S.J., Stable isotope homogeneisation of polar firn and ice, In *Isotopes and Impurities in snow and ice*, IAHS Publ., 118, 210-219, 1977.
- Joussaume,S., Paleoclimatic tracers : An investigation using an atmospheric general circulation model under ice age conditions, *Journal of Geophysical Research*, 98, 2767-2805, 1993.
- Junge, C.E., Comments on the concentration of size distribution measurements of atmospheric aerosols and a test of the theory of self-preserving size distribution. *Journal of Atmospheric Science*, 26, 603-615, 1969.
- Junge, C.E., Processes responsible for the trace content in precipitations. In *Isotopes and Impurities in snow and Ice*, IAHS, 63-77, 1977.

- Kahl, J.D., J.M. Harris, G.A., Herbert and M.P. Olson, Intercomparison of three long-range trajectory models applied to arctic haze, *Tellus*, 41B, 524-536, 1989.
- Kahl, J. D., A cautionary note on the use of air trajectories in interpreting atmospheric chemistry measurements, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 3037-3038, 1993.
- Kahl, J.D.W., D.A. Martinez, H. Kuhns, C.I. Davidson, J.L. Jaffrezo and J.M. Harris, Air mass trajectories to Summit, Greenland : A 44-year climatology and some episodic events, *Journal of Geophysical Research*, 102, 26 861-26 876, 1997.
- Kalina, M.F. and H. Puxbaum, A study of the influence of rimming of ice crystals on snow chemistry during different seasons in precipitating continental clouds, *Atmospheric Environment*, Vol 28, 20, 3311-3328, 1994.
- Keene, W.C., A.P. Pszenny, D.J. Jacob, R.A. Duce, J.N. Galloway, JJ Schultz-Tokos, H. Sievering and J.F. Boatman, The geochemical cycling of reactive chlorine through the marine troposphere, *Global Biogeochemical Cycles*, 4, 407-430, 1990.
- Kumai, M. and K. E. Francis, Nuclei in snow and ice crystals on Greenland ice cap under natural and artificially stimulated conditions, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19, 474-481, 1962.
- Laj, P., J. M. Palais and H. Sigurdsson, Changing sources of impurities to the Greenland ice sheet over the last 250 years, *Atmospheric Environment*, 26A, 14, 2627-2640, 1992.
- Lasaga, A.C., Chemical Kinetics of water-rock interactions, *Journal of Geophysical Research*, 89, 4 009-4 025, 1984.
- Lebris, N., Contribution à l'étude de la distribution particulaire dissous de métaux-trace dans les précipitations, Thèse, Université Paris 7, 1993.
- Legrand, M., C. Lorius, N. I. Barkov and V. N. Petrov, Vostok (Antarctica) ice core: Atmospheric chemistry changes over the last climatic cycle (160,000 years), *Atmospheric Environment*, 22, 2, 317-331, 1988.
- Legrand, M., J. Jouzel and D. Raynaud, Past climate and trace content of the atmosphere inferred from polar ice cores, In 'European Research Course on Atmospheres, Topics in atmospheric and interstellar physics and chemistry' C. Boutron (ed), 453-477, 1994.
- Legrand, M. and M. d. Angelis, Origins and variations of light carboxylic acids in polar precipitation, *Journal of Geophysical Research*, 100, 1, 1445-1462, 1995.
- Legrand, M and M. De Angelis, Light carboxylic acids in Greenland ice : A record of past forest fires and vegetation emissions from the boreal zone, *Journal of Geophysical Research*, 101, 2, 4129-4145, 1996.
- Legrand, M. and P., Mayewski, Glaciochemistry of polar ice cores : a review, *Reviews of Geophysics*, 35, 3, 219-243, 1996.

- Legrand, M., A. Léopold and F. Dominé, Acidic gases (HCl, HF, HNO<sub>3</sub>, HCOOH and CH<sub>3</sub>COOH) : A review of ice core data and some preliminary discussions on their air-snow relationships, In : 'Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow' E.W. Wolff and R.C. Bales (ed), NATO ASI Series I, 19-43, 1996.
- Legrand, M., C. Hammer, M. De Angelis, J. Savarino, R. Delmas, H. Clausen and S.J. Johnsen, Sulfur-containing species (methanesulfonate and SO<sub>4</sub>) over the last climatic cycle in the Greenland Ice Core Project (central Greenland) ice core, *Journal of Geophysical Research*, 102, 12, 26,663-26,679, 1997.
- Leinen, M., J. M. Prospero, E. Arnold and M. Blank, Mineralogy of aeolian dust reaching the North Pacific ocean. 1. Sampling and analysis, *Journal of Geophysical Research*, 99, 10, 21,017-21,023, 1994.
- Li, S.M. and J.W., Winchester, Particle size distribution and chemistry of late winter arctic aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 85, 13897-13908, 1990.
- Liu, CQ, A. Masuda, A. Okada, S. Yabuki, J. Zhang and ZL Fan, A geochemical study of loess and desert sand in northern China : implications for continental crust weathering and composition, *Chemical Geology*, 106, 359-374, 1993.
- Liu, TS., *Loess in China*, 2<sup>nd</sup> ed., 1988.
- Losno, R., J. L. Colin, N. L. Bris, G. Bergametti, T. Jickells and B. Lim, Aluminium solubility in rainwater and molten snow, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 17, 29-43, 1993.
- Losno, R., G. Bergametti, P. Carlier and G. Mouver, Major ions in marine rainwater with attention to sources of alkaline and acidic species, *Atmospheric Environment*, 25A, 3/4, 763-770, 1991.
- Lowenthal, D.H., and K.A., Rahn, Regional sources of pollution aerosol at Barrow, Alaska during winter 1979-80 as deduced from elemental tracers. *Atmospheric Environment*, 16, 2011-2024, 1985.
- Lowenthal, D.H., R.D., Borys and B.W., Mosher, Sources of pollution aerosol at Dye 3, Greenland, *Atmospheric Environment*, 31, 22, 3707-3717, 1997.
- Maenhaut, W., R., Hillamo, T., Maëkela, J.L., Jaffrezo, M.H., Bergin and C.I., Davidson, Detailed mass size distributions of particulate trace elements at Summit, Greenland, *Journal of Aerosol Science*, 27, Suppl. 1, 49-50, 1996.
- Maenhaut, W., Final report, In *Final technical report TAGGSI*, Contract EV5V-0412, 1997.
- Mamane, Y, J.L. Miller and T.G. Dzubay, Characterisation of individual fly ash particles emitted from coal and oil fired power plants, *Atmospheric environment*, 20, 11, 2125-2135, 1986.
- Martens, C.S., J.J. Weselowski, R.C. Harriss and R. Kaifer, Chlorine loss from Puerto Rican and San Francisco Bay area marine aerosols, *Journal of Geophysical Research*, 78, 8778-8792, 1973.
- Martinierie, P., V. Y. Lipenkov, D. Raynaud, J. Chappellaz, N. I. Barkov and C. Lorius, Air content paleo record in the Vostok ice core (Antarctica): A mixed record of climatic and glaciological parameters, *Journal of Geophysical Research*, 99, 5, 10,565-10,576, 1994.

- Martyn, D., *Climates of the World*, Elsevier, 1992.
- Masclet, P., V. Hoyau, JL Jaffrezo and M. Legrand, Evidence for the presence of PAH in the polar atmosphere and the polar ice of Greenland, *Analisis*, 23, 250-252, 1995.
- Mason, B. J. and J. Maybank, Ice-Nucleating properties of some natural mineral dusts, *Quaternary Journal of Royal Meteorology Society*, 84, 235-276, 1958.
- Mason, B., *Principles of geochemistry*, 3<sup>rd</sup> edition, J. Willey and Sons (eds), 1966.
- Mayewski, P. A., M. J. Spencer, W. B. Lyons and M. S. Twickler, Seasonal and spatial trends in south Greenland snow chemistry, *Atmospheric Environment*, 21, 4, 863-869, 1987.
- Mayewski, P.A., W.B. Lyons, M.J. Spencer, M.S. Twickler, C.F. Buck and S. Whitlow, An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulfate and nitrate, *Science*, 346, 554-556, 1990.
- Mayewski, P. A., M. J. Spencer, M. S. Twickler and S. Whitlow, A Glaciochemical survey of the Summit region, Greenland, *Annals of Glaciology*, 14, 186-190, 1990a.
- Mayewski, P.A., L.D. Meeker, S. Whitlow, M.S. Twickler, M.C. Morrison, P. Bloomfield, G.C. Bond, R.B. Alley, A.J. Gow, P.M. Grootes, D.A. Meese, M. Ram, K.C. Taylor and W. Wumkes, Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover over the North Atlantic during the last 41 000 years, *Science*, 263, 1747-1751, 1994.
- Mazureck, M.A., W.R. Cofer III and Levine J.S., Carbonaceous aerosols from prescribed burning of a boreal forest ecosystem. In *Global Biomass Burning*, L. J.S (Eds), 258-263, 1991.
- McCrone, W.C and J.G. delly, *The particle Atlas*, edition two, Vol III Ann Arbor Science, An Arbor, MI, 1973.
- Merrill, J. T., M. Uematsu and R. Bleck, Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 94, 8584-8598, 1989.
- Merrill, J., E. Arnold, M. Leilen and C. Weaver, Mineralogy of aeolian dust reaching the North pacific Ocean. 2. Relationship of mineral assemblages to atmospheric transport patterns, *Journal of Geophysical Research*, 99, 10, 21,025-21,032, 1994.
- Middleton, N. J., Dust storms in the Mongolian People's Republic, *Journal of Arid Environments*, 20, 287-297, 1991.
- Mitchell, D. L. and D. lamb, Influence of riming on the chemical composition of snow in winter orographic storms, *Journal of Geophysical Research*, 94, 12, 14,831-14,840, 1989.
- Möller, D., Cloud processes in the troposphere, In 'Ice Core Studies of Global Biogeochemical Cycles', R. Delmas (eds), NATO ASI, Series I, 39-63, 1995.
- Mosher, B. W., P.Winkler and J. L. Jaffrezo, Seasonal aerosol chemistry at Dye 3, Greenland, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2761-2772, 1993.

- Neftel, A., P.Jacob and D. Klockow, Measurements of hydrogen peroxide in polar ice samples, *Nature* 331, 43-45, 1984.
- Nettleton, W.D. and B.R. Brasher, Correlation of clay minerals and properties of soils in the Western United states, *Soil Science Society of America Journal*, 47, 1032-1036, 1983.
- Nriagu, J.O., R.D., Coker and L.A., Barrie, Origin of sulphur in Canadian Arctic haze from isotope measurements, *Nature*, 349, 142-145, 1991.
- Ohmura, A. and N. Reeh, New precipitation and accumulation maps for Greenland, *Journal of Glaciology*, 37, 125, 140-148, 1991.
- Okada, K., H., Naruse, T., Tanaka, O., Nemoto, Y., Iwasaka, P.W, Wu, A., Ono, R.A., Duce, M., Uematsu and J.T., Merill, X-Ray Spectrometry of individual asian dust-storm particles over the japanese islands and the North Pacific ocean, *Atmospheric environment*, 24A, 6, 1369-1378, 1990.
- Osada, K. and J. C.C. Langway, Background levels of formate and other ions in ice cores from inland Greenland, *Geophysical Research Letters*, 20, 23, 2647-2650, 1993.
- Pacyna, J.M., V. Vitols and J.E. Hanssen, size differentiated composition of the arctic aerosol at Ny Alesund, Spitsbergen, *Atmospheric Environment*, 11, 2447-2459, 1984.
- Pacyna, J. M. and B. Ottar, Origin of natural constituents in the arctic aerosol, *Atmospheric Environment*, 23, 4, 809-815, 1989.
- Palais, J. M., K. Taylor, P. A. Mayewski and P. Grootes, Volcanic ash from the 1362 A.D. Oraefajokull eruption (Iceland) in the Greenland ice sheet, *Geophysical Research Letters* 18, 7, 1241-1244, 1991.
- Parungo F.P.,C.T., Nagamoto and J.M. Harris, Temporal and spatial variations of marine aerosols over the Atlantic Ocean, *Atmospheric Research*, 20, 23-37, 1986.
- Parungo, F., C. Nagamoto, G. Herbert, J. Harris, R. Schnell, P. Sheridan and N. Zhang, Individual particle analyses of arctic aerosol samples collected during AGASP-III, *Atmospheric Environment*, 27A, 17/18, 2825-2837, 1993.
- Patterson, E.M. and D.A. Gillette, Commonalities in measured size distributions for aerosols having a soil-derived component, *Journal of Geophysical Research*, 82, 15, 2074-2082, 1977.
- Pertuisot, M.H., Transfert du carbone atmosphérique dans les neiges et les pluies, Thèse de l'Université Paris 7, 1997.
- Picciotto, E.E. and S. Wilgain, Fission product in Antarctic snow, A référence level for measuring accumulation, *Journal of Geophysical Research*, 68, 5965-5972, 1963.
- Pomeroy, J.W and H.G. Jones, Wind-blown snow : sublimation, transport and changes to polar snow, In *Chemical Exchange Between the atmosphere and Polar Snow*, E.W., Wolff and R.C., Bales (eds), NATO ASI SerieI,453-489, 1996.

- Porter, S.C., and Z., An, Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation, *Nature*, 375, 305-308, 1995.
- Prospero, J.M., and T.N., Carlson, Dust concentration in the atmosphere of the equatorial North Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 77, 5255-5265, 1972.
- Prospero, J. M., R. J. Charlson, V. Mohnen, R. Jaenicke, A. C. Delany, J. Moyers, W. Zoller and K. Rahn, The atmospheric aerosol system: An overview, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 21, 1607-1629, 1983.
- Prospero, J.M., R.T. Nees and M. Uematsu, Deposition rate of particulate and dissolved aluminium derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida, *Journal of Geophysical Research*, 92, 14 723-14731, 1987.
- Prospero, J.M., M. Uematsu and D.L. Savoie, Mineral aerosol transport to the Pacific ocean, In *Chemical Oceanography*, JP Riley, R. Chester, R.A. Duce (eds), 10, 187-218, 1989
- Prospero, J.M., The atmospheric transport of particles to the ocean, In *Particle Flux in the Ocean*, V. Ittekkö, P. Scäfer, S. Honjo and PJ Depetris (eds), 19-52, 1996.
- Pruppacher, H.R. and J.D. Klett, *Microphysics of Cloud and Precipitation*, Reidel, Dordrecht, 1980.
- Pueschel, R.F., J.F. Boatman and R.S. Artz, aerosols over the western Atlantic: scale heights, concentrations and fluxes, *Atmospheric Environment*, 22, 2371-2380, 1988.
- Putnins, P., The climate of Greenland, In *World survey of climatology*, 14 : *Climates of the Polar regions*, S., Orvig (eds), Elsevier, 3-128, 1970.
- Pye, K., *Aeolian dust and dust deposits*, Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, Academic Press 1987.
- Querol, X., A., Alastuey, A., Lopez-Soler, E., Mantilla and F., Plana, Mineral composition of atmospheric particulates around a large coal-fired power station, *Atmospheric Environment*, 30, 21, 3557-3572, 1996.
- Quisefit, J.P, P. de Chateaubourg, S. Garivait et E. Steiner, Quantitative analyses of aerosol filters by wavelenght-dispersive X -ray Spectrometry from bulk référence samples, *X Ray Spectrometry*, 23, 59-64, 1994.
- Raatz, W. E. and G. E. Shaw, Long range atmospheric transport of pollution aerosols into the alaskan arctic, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1052-1064, 1984.
- Rahn, K. A., Silicon and aluminium in atmospheric aerosols: Crust-air fractionation, *Atmospheric Environment*, 10, 597-601, 1976.
- Rahn, K. A., R. D. Borys and G. E. Shaw, Asian source of arctic haze bands, *Nature*, 268, 713-715, 1977.
- Rahn, K.A and R.J., Mc Caffrey, On the origin and transport of the winter arctic aerosol, *Annals New York Academy of Science*, 338, 486-503, 1980

- Rahn, K. A., Relative importance of north America and eurasia as sources of arctic aerosol, *Atmospheric Environment*, 15, 8, 1447-1455, 1981.
- Ram, M. and R. I. Gayley, Insoluble microparticle size distributions in greenland ice, *Journal of Physical Chemistry*, 87, 4120-4121, 1983.
- Ram, M. and R. I. Gayley, Insoluble particles in polar ice: Identification and measurement of the insoluble background aerosol, *Geophysical Research Letters*, 21, 6, 437-440, 1994.
- Ramsden, A. R. and M. Shibaoka, Characterization and analysis of individual fly-ash particles from coal fired power stations by a combination of optical microscopy, electron microscopy and quantitative electron microprobe analysis, *Atmospheric Environment*, 16, 9, 2191-2206, 1982.
- Rea, D.K., The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep-sea : the geological history of wind, *Review of Geophysics*, 32, 159-195, 1994.
- Reid, D.A., R.C. Graham, L.A. Douglas and C. Amrhein, Smectite mineralogy and charge characteristics along an arid geomorphic transect, *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1602-1611, 1996.
- Robock, A. and M. P. Free, Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present, *Journal of Geophysical Research*, 100, 6, 11,549-11,567, 1995.
- Rosman, K. J. R., W. Chisholm, C. F. Boutron, J. P. Candelone and U. Görlach, Isotopic evidence for the source of lead in Greenland snows since the late 1960s, *Nature*, 362, 333-335, 1993.
- Sabre, M., Etude dynamique du processus d'émission de poussières désertiques : impact sur le fractionnement chimique entre sol et aérosol, Thèse, Paris 7, 1997.
- Sarnthein, M., Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum, *Nature*, 272, 43-46, 1978.
- Savoie, D.L., J.M. Prospero and E.S. Saltzman, Non sea-salt and nitrate in trade wind aerosols at Barbados : evidence for a long range transport, *Journal of Geophysical Research*, 94, 5069-5080, 1989.
- Schütz, L. and M. Sebert, Mineral aerosols and source identification, *Journal of Aerosol Science*, 18, 1-10, 1987.
- Shaw, G.E, Optical, chemical and physical properties of aerosols over the Antarctic Ice Sheet, *Atmospheric Environment*, 14, 911-922, 1980.
- Sheridan, P. J., Characterisation of size segregated particles collected over Alaska and the Canadian high arctic, AGASP-II flights 204-206, *Atmospheric Environment*, 23, 11, 2371-2386, 1989.
- Sigg, A. and A. Neftel, evidence of a 50 % increase in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> over the past 200 years from a Greenland ice core, *Nature* 351, 557-559, 1991.
- Silvente E., Contribution à l'étude de la fonction de transfert air neige en régions polaires, Thèse université Grenoble I., 1993.

- Silvente, E. and M. Legrand, Ammonium to sulphate ratio in aerosol and snow of Greenland and antarctic regions, *Geophysical Research Letters*, 20, 8, 687-690, 1993
- Singer, A., illite in aridic soils, desert dusts and desert loess, *Sedimentary Geology*, 59, 251-259, 1988.
- Spokes, L. J., T. D. Jickells and B. Lim, Solubilisation of aerosol trace metals by cloud processing: A laboratory study, *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 58, 15, 3281-3287, 1994.
- Staebler, R.M., G., Den Hartog, B., Georgi and T., Düsterdiek, Aerosol size distributions during the Polar sunrise experiment 1992, *Journal of Geophysical Research*, 99, 25429-25439, 1994.
- Staffelbach, T., A. Neftel, B. Stauffer and D. Jacob, A record of the atmospheric methane sink from formaldehyde in polar ice cores. *Nature* 63, 10 603-10605, 1991.
- Statham, P.J and R. Chester, Dissolution of manganese from marine particulates into seawater and rainwater, *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 52, 2433-2437, 1988.
- Steffensen, J. P., Analysis of the seasonal variation in dust, Cl-, NO<sub>3</sub>-, and SO<sub>4</sub>2- in two central Greenland firn cores, *Annals of Glaciology*, 10, 171-177, 1988.
- Steffensen, J.P., H.B., Clausen and J.M., Christensen, On the spatial variability of impurity content and stable isotopic composition in recent summit snow, *NATO ASI Series, Vol I43, Chemical Exchange Between the atmosphere and Polar snow, E.W.Wolff and R.C., Bales (eds)*, 1996.
- Steffensen, J.P., The size distribution of microparticleless from selected segments of the Greenland Ice core Project ice core from Summit, Greenalnd, *Journal of Geophysical Research*, 102, 26 755-26 764, 1997.
- Stumm, W. and J.J., Morgan, Precipitation and dissolution, *In aquatic Chemistry*, John Wiley and sons ed., Wiley-Interscience, New-York, 230-322, 1981.
- Stumm, W., G. Fuhrer, E. Wieland and B. Zinder, The effects of complex forming ligands on the dissolution of oxides and aluminosilicates, *In the Chemistry of the Weathering*, J.I. Dreier (eds), 1985.
- Stumm, W. and R. Wollast, Coordination chemistry of weathering : kinetics of the surface-controlled dissolution of oxide minerals, *Review of Geophysics*, 28, 53-69, 1990.
- Sturges, W. T. and L. A. Barrie, Stable lead isotope ratios in arctic aerosols: evidence for the origin of arctic air pollution, *Atmospheric Environment*, 23, 11, 2513-2519, 1989.
- Taylor, S.R. and S.M., Mc Lennan, *The continental Crust : Its composition and evolution*, Blackwells, Oxford, England, 1985.
- Thompson, L. G., Variations in microparticle concentration, size distribution and elemental composition found in Camp century, Greenland and Byrd station, Antarctica, deep ice cores, *Isotopes and Impurities in Snow and ice, Proceedings of the Grenoble Symposium, August-September 1975, IAHS*, 118, 351-364, 1977.

- Thompson, L. G. and E. Mosley Thompson, Temporal variability of microparticle properties in polar ice sheets, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11, 11-27, 1981.
- Turekian, K.K., Geochemical distribution of the elements, *Encyclopedia of Science and Technology*, Vol 4, 627-630, 1971.
- Uematsu, M., R. A. Duce, J. M. P. Chien, J. T. Merrill and R. L. McDonald, Transport of mineral aerosol from Asia over the north Pacific ocean, *Journal of Geophysical Research*, 88, 5343-5352, 1983.
- Van Malderen, H., R. V. Grieken, T. Khodzher, V. Obolkin and V. Potemkin, Composition of individual aerosol particles above Lake Baikal, Siberia, *Atmospheric Environment*, 30, 1453-1465, 1996.
- Velde, B., *Origin and mineralogy of clays. Clays and the Environment.*, 335 pp., Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- Vinogradov, A. P., *The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils*, 2nd. Edn. consultants Bureau, Inc., New York, 1959.
- Wahlin, P., One year's continuous aerosol sampling at Summit in central Greenland, In *Chemical Exchange Between the atmosphere and Polar Snow*, E.W., Wolff and R.C., Bales (eds) NATO ASI Serie, 43, 131-143, , 1996.
- Watson, J.G., Chemical element balance receptor model methodology for assessing the sources of fine and total suspended particulate matter in Portland, Oregon. Doctoral dissertation, Oregon Graduate Center, Portland, oregon, 1979.
- Wedepohl, K.H., *Geochemistry*, Reinhart and Wilson Inc., 1971.
- Welch, H.E., D.C.G., Muir, BN, Billeck, W.L., Lockhart, G.J., Brunskill, H.J., Kling, M.P., Olson and R.M. Lemoine, Brown snow : a long range transport event in the Canadian Arctic, *Environmental Science and Technology*, 25, 280-286, 1991.
- Wheeler, D., Saharan dust storm over England, *New scientist*, 1443, 26, 1985.
- Whitlow, S., P. A. Mayewski and J. E. Dibb, A comparison of major chemical species seasonal concentration and accumulation at the South Pole and Summit, Greenland, *Atmospheric Environment*, 26A, 11, 2045-2054, 1992.
- Winchester, J. W., L. Weixiu, R. Lixin, W. Mingxing and W. Maenhaut, Fine and coarse aerosol composition from a rural area in North China, *Atmospheric Environment*, 15, 933-937, 1981.
- Windom, H.L., Eolian contributions to marine sediments, *Journal of Sedimentary Petrology*, 45, 2, 520-529, 1975.
- Wolff, E.W., The record of aerosol deposited species in ice cores, and problems of interpretation, In : 'Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow' EW. Wolff and R.C. Bales (eds), NATO ASI Series I, 1-17, 1996.

- Yang, Q., P.A. Mayewski, E. Linder, S. Whitlow and M.Twickler, Chemical species spatial distribution and relationship to elevation and snow accumulation rate over the Greenland Ice Sheet, *Journal of Geophysical Research*, 101, D13, 18 629-18 637, 1996.
- Yibing, Q., W. Zhaoning, T. Ishii, Y. Kanai, K. Okumula and Y. Matsuhisa, A study on the sand source of the Taklimakan desert, *Chinese Journal of Arid Land Research*, 7, 2, 123-131, 1994.
- Zhang, X., G. Zhang, G. Zhu, D. Zhang, Z. An, T. Chen, X. Huang, Elemental tracers for chinese source dust, *Science in China, Series D*, 39, 5, 512-521, 1996.
- Zhang, X., Z. Shen, G. Zhang, T. Chen and H. Liu, Remote mineral aerosols in Westerlies and their contributions to the Chinese loess, *Science in China, Series D*, 39, 2, 132-143, 1996a.
- Zhang, X., R. Arimoto and Z.S. An, Dust emission from chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation, *Journal of Geophysical Research*, 102, 28 041-28047, 1997.
- Zheng, HH., Paleoclimate events recorded in clay minerals in loess of China, In *Quaternary Geology and Environment of China*, Liu TS. (eds), 83-91, 1985.
- Zhou, G. and K. Tazaki, Seasonal variation of gypsum in aerosol and its effect on the acidity of wet precipitation on the Japan sea side of Japan, *Atmospheric Environment*, 30, 19, 3301-3308, 1996.
- Zhuang, G., Z., Yi, R.A., Duce and P.R., Brown, Chemistry of iron in marine aerosols, *Global Biogeochemical Cycles*, 6, 161-173, 1992.
- Zielinski, G. A., Stratospheric loading and optical depth estimates of explosive volcanism over the last 2100 years derived from the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core, *Journal of Geophysical Research*, 100, 10, 20,937-20,955, 1995.
- Zitong, G., C. Hongzhao, W. Zhenquan, C. Fengqi and L. Guobao, The epigenic geochemical types of loess in China, In *Aspects of loess research*, TS. Liu (eds), 328-340, 1987.

---

***L*ISTE DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX**

---

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

### Introduction.

<b>Figure 1</b> : La localisation des forages profonds (cercle) et des sites de prélèvements atmosphériques (triangle) au Groenland.....	11
<b>Figure 2</b> (De Angelis et al., 1997) : Les valeurs moyennes et les variabilités de la concentration en $\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$ et $\text{Ca}^{2+}$ mesurées le long du forage GRIP.....	13

### Chapitre I : Mise en œuvre expérimentale

<b>Figure I.1</b> : Coupe transversale d'une calotte idéalisée.....	16
<b>Figure I.2</b> : Carte indiquant la localisation des camps de forage et des sites de prélèvement de ATM à Summit.....	17
<b>Figure I.3</b> : Observation au MET à très faible grossissement de la grille de microscopie d'un échantillon du puits ATM91.....	21
<b>Figure I.4</b> : Détail du matériel de filtration utilisé dans une boîte à gant sous atmosphère d'azote.....	25
<b>Figure I.5</b> : La concentration en aluminium soluble obtenue pour les échantillons analysés par SAAG (nos mesures) et par ICP-MS (Colin, communication personnelle) 2 ans auparavant.....	30
<b>Figure I.6</b> : Définition du diamètre effectif mesuré par l'analyseur d'image semi-automatique.....	36
<b>Figure I.7</b> : Observation au MET à faible grossissement d'un échantillon très chargé en particules.....	37
<b>Figure I.8</b> : Observation au MET à faible grossissement d'un échantillon peu chargé en particules.....	38
<b>Figure I.9</b> : Les différentes analyses granulométriques effectuées sur un même échantillon.....	39
<b>Figure I.10</b> : Exemple d'une répartition granulométrique mesurée sur un échantillon (printemps 1991) et de celle obtenue après justement selon une distribution log-normale.....	40

### Chapitre II : La saisonnalité de l'apport en particules minérales dans les neiges récentes

<b>Figure II.1</b> : Le raccordement des concentrations en aluminium pour les puits ATM 91 et ATM 92.....	46
<b>Figure II.2</b> : La concentration en aluminium le long du puits ATM 9192.....	47
<b>Figure II.3</b> .: La concentration en aluminium (nos mesures) et en $\text{H}_2\text{O}_2$ (Bales, com.pers.) le long du puits ATM 9192.....	51
<b>Figure II.4</b> : La concentration en aluminium (nos mesures) et en $\text{SO}_4^{2-}$ (Jaffrezo, com.pers.) le long du puits ATM 9192.....	53
<b>Figure II.5</b> : La concentration en aluminium insoluble et en sodium soluble le long du puits ATM 9192.	54
<b>Figure II.6</b> : Les couches saisonnières le long du puits ATM 9192.....	55
<b>Figure II.7</b> (Barrie, 1995) : Les variations saisonnières en sulfate constatées à Alert (Canada Arctique) sur la base d'observations hebdomadaires de 1980 à 1990.....	59

<b>Figure II.8</b> (Barrie, 1986) : La position du front arctique en hiver (en gras) et la localisation des principales stations de collecte de l'aérosol dans le cadre de l'étude de l'Arctic Haze.....	60
<b>Figure II.9</b> : La position du front polaire en été et en hiver, En haut : au niveau de la surface terrestre En bas : à 500 mb.....	61
<b>Figure II.10</b> : La corrélation entre le coefficient d'abattement de l'aluminium et du fer à Dye 3 (Colin et al., 1997) et à Summit (nos mesures).....	71

**Chapitre III : L'influence des sources sur la saisonnalité de l'aérosol minéral dans les neiges**

<b>Figure III.1</b> : La concentration élémentaire le long du puits ATM 9192 pour les éléments majeurs (Si, Al, Fe, Mg).....	75
<b>Figure III.2</b> : Les droites de corrélation entre les concentrations en aluminium et les autres éléments (Si, Mg, Fe, Na, Ti, K) pour les échantillons du puits ATM 9192.....	76
<b>Figure III.3</b> : Rapport Si/Al de la fraction insoluble des échantillons le long du puits ATM 9192 et rapport Si/Al typique pour les aérosols terrigènes et pour les aérosols anthropiques.....	79
<b>Figure III.4</b> : Le rapport Si/Al de la fraction insoluble en fonction des saisons archivées dans le puits ATM 9192.....	80
<b>Figure III.5</b> : Observation au MET de microsuires sous forme de chaîne ou d'agrégats (échantillon printemps 1989).....	81
<b>Figure III.6</b> : La symétrie des taches de microdiffraction obtenue par micro-diffraction X pour un phyllosilicate.....	83
<b>Figure III.7</b> : Observation d'un verre volcanique au MET et spectre chimique associé obtenu par la micro-analyse (Echantillons printemps 1991).....	84
<b>Figure III.8</b> : Observation au MET de fibres de palygorskites et spectre chimique associé (Echantillon hiver 1989/1990).....	84
<b>Figure III.9</b> : Diatomées observées pour les échantillons de neiges, a : 'Navicula Mutica' d'origine continentale et spectre chimique associé (MET), b : 'Fragilaria virescens' d'origine continentale (MEB).....	86
<b>Figure III.10</b> : Observation au MET d'une cendre volante et spectre chimique associé (Echantillon printemps 1989).....	87
<b>Figure III.11</b> : Distribution des régions avec une fréquence de tempêtes élevée et principales directions des trajectoires suivies par les particules (D'après Coudé-Gaussan, 1984).....	88
<b>Figure III.12</b> (Kahl et al., 1997): La variation saisonnière des trajectographies moyennes arrivant à Summit (500hPa) pour les quatre types de transport de 1946 à 1989, a : hiver, b : printemps, c : été, d : automne.....	89

**Figure III.13** (Kahl et al., 1997) : La variation saisonnière des trajectographies moyennes arrivant à

Summit (700hPa) pour les quatre types de transport de 1946 à 1989, a : hiver, b : printemps, c : été, d : automne.....	90
<b>Figure III.14 :</b> Observation d'une muscovite illite et spectre chimique associé (Echantillon printemps 1989).....	93
<b>Figure III.15 :</b> Observation d'une smectite et spectre chimique associé (Echantillon hiver 1989/1990)...	94
<b>Figure III.16:</b> Observation d'une kaolinite et d'une chlorite et spectres chimiques associés (Echantillon printemps 1989).....	94
<b>Figure III.17:</b> La composition élémentaire en oxydes pour chaque feldspath dénombré parmi les 4 échantillons.....	99
<b>Figure III.18</b> (Chang et al., 1996) : Les principales sources d'émissions de poussières en Asie de l'est...	100
<b>Figure III.19 :</b> Zones délimitées par les valeurs du rapport Ti/Fe et Mg/Al, tirés de la littérature et correspondant à 3 régions d'Asie de l'est : 30-40° est, 30-40° ouest et 40-45 °.....	108
<b>Figure III.20 :</b> Les différentes régions sources délimitées par les 3 enveloppes et les rapports moyens obtenus pour les neiges archivées et pour l'aérosol. Les barres indiquent l'écart géométrique autour de la valeur moyenne.....	110
<b>Figure III.21 :</b> Les différentes régions sources délimitées par les 3 enveloppes et les rapports moyens obtenus pour les neiges archivées et pour l'aérosol. Les barres indiquent l'écart géométrique autour de la valeur moyenne.....	111
<b>Figure III.22</b> (Porter and An, 1995): La pression de l'atmosphère en surface pour le mois de Janvier sur la région est de l'Asie.....	112
<b>Figure III.23</b> (Martyn, 1992) : La fréquence des tempêtes mensuelles pour le plateau de loess de Chine (Lazhou, Luoyang).....	112

#### Chapitre IV : L'influence de l'abattement sur la saisonnalité

<b>Figure IV.1:</b> Les distributions granulométriques en nombre des particules terrigènes en fonction du diamètre effectif obtenues pour les différentes analyses des échantillons de printemps.....	119
<b>Figure IV.2:</b> Les distributions granulométriques en nombre des particules terrigènes en fonction du diamètre effectif obtenues pour les différentes analyses des échantillons d'hiver.....	120
<b>Figure IV.3:</b> La distribution granulométrique en masse en fonction du diamètre aérodynamique pour les différentes analyses des échantillons de printemps.....	123
<b>Figure IV.4</b> ( Losno et al., 1993): p[Al <sup>3+</sup> ] en fonction de pH pour les différentes précipitations collectées en Corse (Cor), dans l'Atlantique Sud (Atl), dans les Vosges (Vof), en Irlande (Eir), en Ecosse (Sco), au cours de la campagne WATOX (Wat) et en Angleterre (Bri).....	130
<b>Figure IV.5</b> (Spokes et al., 1994): La solubilisation des métaux trace dans l'aérosol saharien en fonction du temps et des cycles successifs de pH, a. Le cycle de pH imposé, b. Le pourcentage de solubilisation de l'aluminium.....	132

<b>Figure IV.6:</b> La concentration en sodium marin et terrigène (soluble+insoluble) le long du puits ATM 92.....	134
<b>Figure IV.7:</b> Les parts marines et crustales du sodium dans la fraction soluble totale.....	135
<b>Figure IV.8:</b> La fraction soluble en fonction de la fraction insoluble du sodium crustal pour les différentes saisons.....	136
<b>Figure IV.9:</b> La fraction soluble en fonction de la fraction insoluble du fer pour les différentes saisons..	137
<b>Figure IV.10:</b> La fraction soluble en fonction de la fraction insoluble de l'aluminium pour les différentes saisons.....	139
<b>Figure IV.11:</b> Variation du pourcentage de solubilisation en aluminium en fonction de sa concentration totale.....	139
<b>Figure IV.12:</b> L'acidité hors CO <sub>2</sub> mesurée et calculée pour les échantillons de neiges du puits ATM 92.....	145
<b>Figure IV.13 :</b> La contribution des différentes espèces ioniques au bilan en acidité mesurée pour les 8 échantillons.....	146
<b>Figure IV.14:</b> La contribution des différentes espèces ioniques au bilan en acidité des gouttelettes de brouillards.....	149
<b>Figure IV.15:</b> Les concentrations en anions mesurées à partir du collecteur passif et les concentrations minimales et maximales obtenues pour les différentes séquences prélevées par le collecteur actif pour un même événement.....	150
<b>Figure IV.16:</b> La concentration en sulfate mesurée dans les événements de brouillard par le collecteur passif comparée aux valeurs estimées (minimale et maximale) à partir de la concentration atmosphérique en sulfate précédant l'événement.....	153
<b>Figure IV.17:</b> Le pH en fonction du pH hors CO <sub>2</sub> pour un pH inférieur à 6.....	156

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I : Mise en œuvre expérimentale**

<b>Tableau I.1 :</b> Les différentes équipes impliquées dans le programme Européen TAGSSI.....	18
<b>Tableau I.2 :</b> Le traitement analytique des échantillons prélevés.....	24
<b>Tableau I.3 :</b> Les concentrations élémentaires en Al obtenues pour les trois filtrats lors du premier test. Chaque filtrat est obtenue après filtration de 250 ml d'eau Milli-Q <sup>TM</sup> . Entre chaque filtrat, la tête de filtration est rincée et séchée.....	26

<b>Tableau I.4 :</b> Les concentrations élémentaires en Al obtenues pour les trois filtrats lors du second test. Chaque filtrat est obtenue après filtration de 250 ml d'eau Milli-Q <sup>TM</sup> . Auparavant, le système de filtration a été utilisé pour le passage d'une solution concentrée en Na, Al et Fe (C : 10µg/l). Entre chaque filtrat, la tête de filtration est rincée et séchée.....	27
---	----

**Chapitre II : La saisonnalité de l'apport en particules minérales dans les neiges récentes**

<b>Tableau II.1 :</b> La contribution relative des apports printaniers en aluminium aux apport annuel.....	56
<b>Tableau II.2:</b> L'association des échantillons d'aérosols et de neiges fraîches collectés à Summit de mai à juillet 1995.....	69
<b>Tableau II.3:</b> Les coefficients d'abattement déterminés pour chacune des précipitations de mai à juillet 1995 à Summit.....	70
<b>Tableau II.4:</b> Les coefficients d'abattement obtenus à Dye 3 (Colin et al., 1997 ; Davidson et al., 1985). ..	70

**Chapitre III : L'influence des sources sur la saisonnalité de l'aérosol minéral dans les neiges**

<b>Tableau III.1:</b> Rapport Si/Al pour différents aérosols terrigènes collectés près des sources ou après un transport longue distance.....	78
<b>Tableau III.2 :</b> Abondance relative (%) des différentes particules insolubles (hors microsues). Entre parenthèse figure le nombre de particules analysées (n).....	82
<b>Tableau III.3 :</b> L'abondance en muscovite illite, smectite, kaolinite et chlorite exprimée en pourcentage du nombre total de particules identifiées sur les échantillons de printemps.....	95
<b>Tableau III.4 :</b> L'abondance en muscovite illite, smectite, kaolinite et chlorite exprimée en pourcentage du nombre total de particules identifiées sur les échantillons d'hiver.....	97
<b>Tableau III.5 :</b> Les facteurs d'enrichissement crustaux moyen ainsi que les écart types géométriques pour Fe, Ti, Mg, K. Ces paramètres ont été calculés à partir des 38 valeurs pour le puits ATM 92.....	103
<b>Tableau III.6 :</b> La contribution marine moyenne et l'écart type géométrique pour le magnésium marin. Ces valeurs sont calculées à partir des 38 échantillons du puits. Entre parenthèses figure le nombre de valeurs utilisé pour chaque saison.....	106
<b>Tableau III.7 :</b> Les références utilisées pour calculer les rapports interélémentaires dans les sols et les aérosols des régions sources de l'Asie de l'est.....	107
<b>Tableau III.8 :</b> Les rapports moyen Ti/Fe et Mg/Al obtenus dans les neiges archivées pendant l'été et dans l'aérosol atmosphérique collecté en été. Entre parenthèse est indiqué l'écart type géométrique.....	109
<b>Tableau III.9 :</b> Les rapports moyen Ti/Fe et Mg/Al obtenus dans les neiges archivées (ATM 92) en fonction des saisons. Entre parenthèse est indiqué l'écart type géométrique.....	110

**Chapitre IV : L'influence de l'abattement sur la saisonnalité**

<b>Tableau IV.1:</b> Les coefficients de variation de la concentration en nombre de particules pour les différentes analyses d'un même échantillon.....	117
<b>Tableau IV.2:</b> La concentration en nombre (moyenne et l'écart type géométrique) pour les échantillons d'une même saison.....	118
<b>Tableau IV.3:</b> Le diamètre médian effectif et l'écart type géométrique de la distribution granulométrique en nombre pour les différentes analyses des échantillons de printemps.....	119

<b>Tableau IV.4:</b> Le coefficient de variation du diamètre médian pour les différentes analyses d'un même échantillon de printemps.....	119
<b>Tableau IV.5:</b> Le diamètre médian effectif et l'écart type géométrique de la distribution granulométrique en nombre pour les différentes analyses des échantillons d'hiver.....	120
<b>Tableau IV.6:</b> Le coefficient de variation du diamètre médian pour les différentes analyses d'un même échantillon d'hiver.....	121
<b>Tableau IV.7:</b> Comparaison des concentrations massiques (ng/ml) obtenues par la microscopie et par spectrométrie de fluorescence X.....	122
<b>Tableau IV.8 :</b> Le diamètre médian aérodynamique et l'écart type géométrique de la distribution granulométrique en masse pour les échantillons de printemps.....	123
<b>Tableau IV.9 :</b> Le diamètre médian aérodynamique en masse obtenu pour des aérosols terrigènes collectés après un transport longue distance au-dessus de l'océan.....	126
<b>Tableau IV.10:</b> Les paramètres de la distribution granulométrique en nombre obtenue pour un échantillon d'aérosol et un échantillon de neige fraîche associé.....	127
<b>Tableau IV.11 :</b> Les constantes de complexation pour les ligands de l'aluminium.....	129
<b>Tableau IV.12:</b> La contribution marine moyenne du sodium et l'écart type géométrique en fonction des saisons. Entre parenthèses figure le nombre de valeurs utilisées.....	134
<b>Tableau IV.13:</b> Le pourcentage de solubilisation moyen du sodium crustal et son écart type en fonction des saisons.....	137
<b>Tableau IV.14:</b> Les concentrations ( $\mu\text{mol/l}$ ) en cations mesurés dans les échantillons de neiges du puits ATM 92.....	141
<b>Tableau IV.15:</b> Les concentrations ( $\mu\text{mol/l}$ ) en anions mesurés par chromatographie ionique (Jaffrezo, com.pers.) dans les échantillons de neige du puits ATM 92.....	142
<b>Tableau IV.16:</b> L'écart à la balance ionique pour les échantillons de neiges du puits ATM92.....	143
<b>Tableau IV.17:</b> La contribution relative non marine des ions sulfates pour les échantillons de neige.....	144
<b>Tableau IV.18:</b> La valeur du pH moyen et son écart type pour les échantillons de neiges fondues en fonction des saisons.....	146
<b>Tableau IV.19:</b> Les concentrations en anions mesurées dans les gouttelettes de brouillard par le collecteur passif ( $\mu\text{mol/l}$ ).....	147
<b>Tableau IV.20:</b> Les concentrations en cations mesurées dans les gouttelettes de brouillard par le collecteur passif ( $\mu\text{mol/l}$ ).....	147
<b>Tableau IV.21:</b> Le pH hors $\text{CO}_2$ calculé pour les gouttelettes de brouillards.....	148
<b>Tableau IV.22:</b> L'écart à la balance ionique pour les gouttelettes de brouillards.....	148
<b>Tableau IV.23:</b> Les concentrations en sulfate dans l'atmosphère précédant les événements de brouillard.....	152