

# 1. Introduction sur les forçages naturels

Edouard Bard

## Un système complexe en équilibre dynamique

Les conditions hospitalières que nous connaissons sur Terre dépendent d'une combinaison fortuite de sa distance par rapport au Soleil, de la présence de la Lune et de la composition chimique de l'atmosphère, paramètres qui conditionnent l'état physique de l'eau sur notre planète (Cf. I.2). En plus de l'atmosphère, le système climatique comprend d'autres compartiments très divers comme l'océan, les glaces marines et continentales, la biosphère et même la croûte terrestre. Ces compartiments, en perpétuelle évolution, échangent entre eux de l'énergie et de l'eau, sous forme solide, liquide ou gazeuse.

La complexité du système climatique vient du fait que tous ses compartiments sont en perpétuelle évolution. L'atmosphère, en particulier, est animée de mouvements rapides et incessants qui sont l'objet d'étude du météorologue. Les échanges d'énergie et de matière sont déstabilisés en permanence par de nombreux forçages, notamment des variations cycliques (alternances diurne et saisonnière, cycles astronomiques de l'insolation...) ou des phénomènes irréguliers comme les éruptions volcaniques.

Ces changements d'amplitudes variées influent sur les transports de chaleur à toutes les échelles spatiales. Ceci est particulièrement vrai pour le cycle saisonnier aux hautes latitudes : une surface d'un mètre carré reçoit environ 200 Watts au niveau du cercle polaire, mais cette insolation moyenne masque de larges fluctuations saisonnières entre un maximum de plus de 500 W lors du solstice d'été et un minimum nul lors du solstice d'hiver (nuit permanente).

Le système climatique physique est aussi couplé à d'autres cycles planétaires comme celui de l'eau, du carbone ou de l'azote. Ainsi, les variations de la biosphère allant de la saison au millénaire, ont une influence sur les teneurs en eau et en gaz carbonique de l'atmosphère. A leur tour, ces changements affectent le bilan radiatif de l'atmosphère et perturbent le système climatique dans son ensemble.

Les différents forçages externes d'origine astronomique ou géologique ont des impacts climatiques très variés en termes d'amplitude et d'échelle spatiale. Par ailleurs, ils interviennent sur des échelles de temps très différentes, de l'année au milliard d'années, et se superposent et se combinent les uns aux autres ce qui en complique l'étude (Cf. figure II.14).

## Etude conjointe des forçages et des variations climatiques

Pour étudier conjointement l'évolution des forçages et des paramètres climatiques aux échelles globales et régionales, une première méthode consiste à analyser les relations statistiques de correspondance temporelle et de contenu fréquentiel des différentes séries. Le principal obstacle est la brièveté des séries instrumentales qui ne permettent d'étudier que le dernier demi-siècle avec les enregistrements quantifiés des forçages externes et des paramètres climatiques. Il est donc utile d'avoir recours à des indicateurs, moins précis car indirects, mesurés dans des archives paléoclimatiques (Cf. III.14). Ces enregistrements permettent d'aller bien au-delà du dernier siècle, lequel est caractérisé par une perturbation significative du bilan radiatif de la Terre et des composantes climatiques par les activités humaines. Il devient ainsi possible d'étudier le climat de la Terre dans son état quasiment naturel et de le comparer avec les dernières et prochaines décennies.

L'évaluation de l'influence des forçages dans les séries climatiques passe nécessairement par une analyse statistique multivariée tenant compte des multiples causes agissant

sur les mêmes constantes de temps : grandes éruptions volcaniques, activité solaire et concentrations des gaz à effet de serre, ainsi que les oscillations intrinsèques au système climatique. Ces analyses statistiques sont conduites à partir des enregistrements de la température moyenne à l'échelle mondiale ou sur les données régionales et verticales pour la période récente la mieux documentée. Les différentes composantes climatiques sont identifiées en étudiant leurs répartitions géographiques et verticales qui constituent des signatures caractéristiques (réchauffement stratosphérique et refroidissement troposphérique pour une éruption volcanique, amplification du réchauffement dans la stratosphère pour une variation solaire, refroidissement stratosphérique et réchauffement troposphérique pour une augmentation de gaz à effet de serre, signatures géographiques de l'ENSO au niveau de l'Océan Pacifique et des continents adjacents, etc.).

L'approche empirique a évidemment ses limites car certains forçages sont encore mal quantifiés – comme les éruptions volcaniques anciennes (Cf. V.7) et la composante ultraviolette du spectre solaire (Cf. V.2) – ou restent encore à l'état d'hypothèse, comme par exemple le rôle exact des particules chargées du rayonnement cosmique (Cf. V.6) ce qui rend difficile leur prise en compte statistique. Par ailleurs, la combinaison de l'influence des forçages ne se résume pas toujours à un cumul mathématique. En effet, un forçage externe naturel ou anthropique peut aussi influencer les variations intrinsèques comme l'amplitude ou la fréquence d'oscillations climatiques (ENSO et NAO).

La corrélation temporelle entre forçage et climat ne suffisant pas pour établir les liens de causalité,



Photographie d'une éruption du volcan islandais Hekla sous une aurore boréale, illustrant l'action conjointe et fortuite du Soleil et d'un volcan sur l'atmosphère terrestre. Pour un exemple d'impact sur le climat mondial, on peut citer l'éruption majeure de 1815 du volcan Tambora en Indonésie ayant contribué à la célèbre « année sans été » de 1816 qui a eu lieu en plein minimum prolongé de l'activité solaire. © Sigurður Stefniðsson ■

on envisage une deuxième méthode fondée sur les mécanismes et les rétroactions climatiques associées. Les processus de base sont régis par des lois physico-chimiques et l'évaluation de leur influence sur le climat global et régional peut être réalisée à l'aide de modèles numériques du climat. La variété des forçages implique que ces modèles possèdent un niveau de sophistication élevé tout en permettant des simulations longues de plusieurs siècles. L'utilisation des modèles de circulation générale permet d'étudier finement les rétroactions climatiques qui amplifient ou atténuent le signal radiatif lié à un forçage particulier ainsi que d'envisager la combinaison multiple des forçages.

La modélisation numérique permet aussi d'utiliser pleinement les reconstitutions paléoclimatiques de climats différents de l'actuel (comme le Petit Age Glaciaire, l'Optimum Médiéval, le Dernier

Maximum Glaciaire, l'Optimum Holocène, le Dryas Récent, le Dernier Interglaciaire, les événements de Heinrich et de Dansgaard-Oeschger, certaines périodes chaudes du Cénozoïque, etc.). On peut ainsi comparer, de manière indépendante, les simulations des modèles perturbés par les forçages aux observations et reconstitutions des paramètres climatiques. De telles comparaisons modèles-données ont permis de progresser dans la compréhension de la machine complexe du climat de la Terre et elles ont poussé les spécialistes de la modélisation à améliorer leurs calculs numériques. Ceux-ci prennent en compte de nombreux processus physico-chimiques dans des architectures de plus en plus complexes pour tenter de reproduire explicitement le véritable système climatique avec ses couplages entre compartiments et ses aspects physiques, chimiques et biologiques.

# 18. Inclusions minérales et gazeuses dans les glaces

Jérôme Chappellaz, Jean-Robert Petit, Francis Grousset et Edouard Bard

Les gaz à effet de serre (GES) et les poussières atmosphériques affectent le bilan radiatif terrestre (Cf. II.2) tandis que l'activité solaire module le flux des rayons cosmiques qui interagit avec les hautes couches de l'atmosphère. Déterminer le rôle joué par ces facteurs sur la variabilité climatique naturelle ou son évolution récente requiert de les reconstituer au cours du temps grâce notamment à l'analyse des glaces polaires : les couches de neige conservent les poussières éoliennes et les aérosols. Entre 50 et 100 mètres de profondeur, ces couches se transforment en glace, emprisonnant des petites bulles d'atmosphère. Grâce aux forages conduits au travers de kilomètres de calottes polaires – suivis du transport réfrigéré des carottes, de leur stockage en chambre froide, de leur décontamination, de leur extraction et de leur analyse – on a pu reconstituer ces informations, qui couvrent à ce jour les derniers 800 000 ans (figure 1).

## Inclusions minérales

Les inclusions minérales dans la glace sont analysées pour déterminer leur concentration massique, leur spectre de taille et leur composition minéralogique et isotopique. Les très faibles teneurs aux pôles (quelques  $\mu\text{g}$  par kg de glace soit  $10^{-9}$  g/g ou

ppb) imposent de décontaminer les carottes de glace en éliminant l'extérieur en contact avec l'atmosphère ou le fluide de forage (kérosène par exemple). Les concentrations et les distributions en taille peuvent être mesurées par un système laser (utilisant la diffusion de la lumière) ou par un compteur Coulter (détection électrique du passage forcé des poussières au travers d'un microtubule de courant). Les mesures laser peuvent être couplées à un système de fusion en continu de la carotte de glace (Continuous Flow Analysis CFA), avec mise en œuvre possible sur le site de forage. Les mesures Coulter

faites en laboratoire sont plus précises et étalonnent les systèmes laser. Les poussières polaires représentent la partie la plus fine émise par les sols : elles sont plus petites que  $5 \mu\text{m}$  et la distribution de la masse présente un mode centré vers  $2 \mu\text{m}$  (diamètre). Leur concentration augmente considérablement en périodes glaciaires à cause du climat froid et sec, contribuant à modifier le bilan énergétique (figure 1).

La composition élémentaire des poussières est obtenue grâce à une microsonde couplée à un microscope électronique, permettant d'identi-

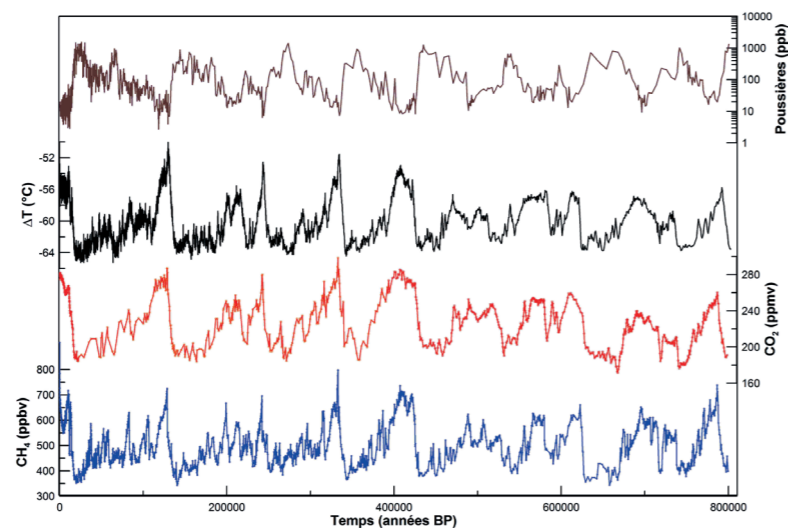


Fig. 1 – De haut en bas : évolution des teneurs en poussières (en ppb), de la température moyenne annuelle (en °C), du  $\text{CO}_2$  (en ppmv) et du  $\text{CH}_4$  (en ppbv) au cours des derniers 800 000 ans, déduite des analyses du forage européen EPICA foré à la base franco-italienne Concordia en Antarctique jusqu'à la profondeur de 3260 m ■

fier les quartz, feldspaths, argiles, verres... À l'aide de sections polies, la composition des verres volcaniques permet d'identifier le type de volcan et de dater la glace si l'éruption est bien documentée par ailleurs.

Les éléments chimiques constitutifs des poussières (comme le strontium Sr, le néodyme Nd ou le plomb Pb) sont analysés isotopiquement par spectrométrie de masse. La composition isotopique permet alors de définir « l'empreinte digitale » des sources de ces particules ; on a ainsi montré que les poussières piégées dans les glaces de l'Antarctique provenaient de Patagonie, alors que celles trouvées dans la glace du Groenland venaient de Chine.

Les enregistrements de béryllium 10 ( $^{10}\text{Be}$ ) permettent de quantifier les variations de production des cosmonucléides et d'étudier les fluctuations passées des champs géomagnétiques et héliomagnétiques. La concentration de  $^{10}\text{Be}$  dans la neige polaire est de l'ordre de  $10^4$  atomes/g. Après avoir fait fondre la glace, le  $^{10}\text{Be}$  est extrait et purifié sous hotte. Une chimie complexe permet de le transformer en oxyde de béryllium comprimé dans une cathode. Celle-ci est placée dans la source d'ions du tandétron ASTER d'Aix-en-Provence pour être bombardée par un faisceau d'ions  $\text{BeO}^+$  généré est analysé en spectrométrie de masse par accélérateur. Les reconstructions de  $^{10}\text{Be}$  couvrant le dernier millénaire sont très bien corrélées aux variations du  $^{14}\text{C}$  dans les anneaux d'arbres, qui reflètent au premier ordre les variations de l'irradiance solaire (Cf. V.3).



Fig. 2 – Éléments d'un système analytique de préconcentration des gaz piégés dans la glace au LGGE, en vue de l'analyse des rapports isotopiques. © L. Médard, photothèque CNRS ■

## Inclusions gazeuses

La quantité de GES piégée dans la glace est très faible : de  $5 \cdot 10^{-11}$  g/g ( $\text{N}_2\text{O}$ ) à  $5 \cdot 10^{-8}$  g/g ( $\text{CO}_2$ ). Leur mesure requiert d'abord une phase d'extraction qui repose sur trois méthodes. Le broyage est bien adapté à l'analyse du  $\text{CO}_2$ . En revanche le faible dégazage de composés issus de la paroi du broyeur rend la méthode en général impropre aux analyses du  $\text{CH}_4$  par exemple. La fusion-cryopompage ou la fusion-regel sont favorisées pour l'analyse de  $\text{CH}_4$  et de  $\text{N}_2\text{O}$ . Elles ne sont pas compatibles avec les analyses du  $\text{CO}_2$  en raison des réactions chimiques ou de l'équilibre acido-basique survenant dans la phase liquide. Enfin, la méthode de sublimation convient à la mesure de tous les GES mais est très lourde à mettre en œuvre.

L'analyse est ensuite conduite par chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme ou capture d'électrons pour déterminer les rapports de mélange des GES. On peut aussi utiliser un détecteur laser travaillant dans l'infrarouge. Les concentrations des GES varient de 40 à 100 % entre périodes glaciaires et interglaciaires (figure 1), en lien fort avec le climat. Elles contribuent à amplifier le forçage climatique initial dû aux variations d'insolation. La composition isotopique des GES apporte des contraintes sur les mécanismes biogéochimiques responsables de ces variations. Elle est déterminée par spectrométrie de masse à secteur magnétique, couplée à une phase de pré-concentration et de séparation chromatographique (figure 2) en raison des très faibles quantités de matière disponible dans la glace.

## Références bibliographiques

- J. CHAPPELLAZ, O. GODARD, S. HUET et H. LE TREUT - *Changement climatique : des savoirs et des possibles*. La Ville brûle, 2010.
- E. BARD - *L'Homme et le climat : une liaison dangereuse*. Gallimard, 2005.

# 7. Effet des éruptions volcaniques sur le climat

Marie-Alexandrine Sicre, Myriam Khodri, Juliette Mignot, Patrick Allard, Yves Balkanski et Edouard Bard

Les éruptions volcaniques « majeures », caractérisées par un « Volcanic Explosivity Index » (VEI)  $\geq 4$  (Simkin and Siebert, 1994), expulsent dans la stratosphère des quantités considérables de gaz et d'aérosols qui affectent le bilan radiatif de la planète et son climat (Cf. II.4). Les gaz volcaniques acides, majoritairement du  $\text{SO}_2$  gazeux mais aussi des composés halogénés (HCl, HF, HBr), modifient également la chimie de la stratosphère en affectant en particulier le cycle de l'ozone. Ce sont les fines particules de sulfates, issues de la transformation du  $\text{SO}_2$  gazeux injecté, qui ont un effet radiatif dominant. L'effet radiatif direct est un réchauffement de la basse stratosphère et un refroidissement net des températures à la surface de la Terre qui peut persister pendant des mois à plusieurs années après l'éruption. L'exemple le plus spectaculaire est celui de l'éruption cataclysmale du Tambora (Indonésie, VEI = 7) en avril 1815, qui a été suivie d'une année « sans été » en 1816 et par un refroidissement global moyen de  $0,7^\circ\text{C}$ . Un exemple plus récent de ces effets, directement quantifiés, a été apporté par l'éruption plinienne du volcan Pinatubo en juin 1991 (Philippines, VEI = 6,  $\Delta T \approx -0,4^\circ\text{C}$ ). L'impact climatique des éruptions dépend donc de leur magnitude (masse de gaz et poussières émises, hauteur d'injection) mais aussi de la

dispersion du nuage d'aérosols volcaniques, variable selon la position géographique du volcan et l'époque de l'année (saison) à laquelle l'éruption intervient. Ainsi, à magnitude égale, les éruptions tropicales ont un effet climatique plus global que les éruptions des hautes latitudes, car dans la stratosphère leurs aérosols sont transportés dynamiquement vers les hautes latitudes par la circulation de Brewer-Dobson. Il existe également des effets radiatifs indirects s'exerçant à travers la circulation atmosphérique et donc l'état dynamique de l'océan et de l'atmosphère. Par conséquent, les relations quantitatives entre forçage volcanique et dynamique du climat (par exemple comment cela affecte le phénomène ENSO) sont complexes et encore mal comprises.

## Injections dans l'atmosphère

La quantification de l'impact climatique du volcanisme sur des échelles de temps longues est difficile car on ne dispose d'observations directes et complètes que pour l'éruption du mont Pinatubo en 1991. Pour estimer l'intensité des éruptions passées on doit se baser sur des indices qui tentent de refléter la charge en aérosol volcanique injectée

dans la stratosphère. Le forçage volcanique est estimé en utilisant divers critères comme le VEI, lui-même estimé d'après les dépôts, ou encore à partir des teneurs en sulfates et acides piégés dans les couches de glace annuelles des carottes de glaces polaires (IVI, Ice core Volcanic Index). Les pics de concentrations en sulfate dans les carottes de glace des deux pôles sont de bons marqueurs d'éruptions volcaniques tropicales majeures dont l'impact climatique est global. La conversion des mesures d'acide sulfurique dans les glaces en épaisseur optique et autres paramètres micro-physiques des aérosols volcaniques est ensuite calibrée grâce aux observations instrumentales des éruptions récentes, telle celle du Pinatubo dont le pic d'acide sulfurique est bien détecté dans les carottes de glace. Cette approche fait l'hypothèse que la micro-physique des aérosols pour les éruptions encore plus fortes, qui ont jalonné le dernier millénaire, est semblable à celle des éruptions récentes.

La reconstruction à l'aide de l'intensité des éruptions passées peut nous permettre de comprendre comment l'activité volcanique influence les climats présents et passés. Mais l'intensité des éruptions à elle seule ne permet pas de prédire les changements de température de l'atmosphère et de l'océan. La localisation de l'éruption, son intensité, la com-

position gazeuse émise, la chimie stratosphérique et la microphysique de l'aérosol doivent aussi être pris en compte.

La localisation de l'injection et le type d'éruption déterminent sa hauteur de pénétration ainsi que la symétrie ou non des retombées aux pôles. Dans le cas de méga éruptions (VEI  $> 7$ ), au-delà d'un certain seuil de flux de matière injectée, la colonne éruptive s'effondre et seule une fraction des cendres franchit la tropopause avec les gaz. Lorsque l'injection passe cette barrière, la même chimie qui intervient en présence de nuages stratosphériques polaires entre en jeu et la présence ou non des acides HCl et HBr est alors déterminante pour prédire les pertes d'ozone stratosphérique. Cette chimie est soumise à des effets de saturation. Il est aussi important de noter qu'au-dessus d'une altitude de 35 km,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  est photolysé et réapparaît sous forme gazeuse en  $\text{SO}_2$ .

Radiativement, la taille de l'aérosol est prépondérante : celle-ci dépend du mélange de vapeur d'eau, de cendres et de  $\text{SO}_2$  qui a été injecté. Les processus de coagulation et de condensation contrôlent la taille de cet aérosol. L'extinction, qui entraîne le refroidissement stratosphérique et troposphérique, est fonction du rapport entre le rayon effectif de l'aérosol et la longueur d'onde. Pour des éruptions dont le volume de gaz injectés dans l'atmosphère est inférieur à 10 fois celui émis par le Pinatubo, les techniques récentes développées par Baroni et al. permettent de savoir si l'injection a atteint la stratosphère. Ces travaux constituent une avancée notable pour améliorer la description de l'effet de ces volcans, reste à connaître la composition gazeuse afin de déterminer la perte en ozone.



Fig. 1 – Colonne éruptive lors de l'éruption du volcan Eyjafjallajökull. © Patrick Allard ■

Les incertitudes sont plus importantes dans le cas des méga éruptions car les colonnes d'injection peuvent s'effondrer. Enfin, si nous voulons pouvoir reconstruire l'influence des volcans sur les températures de l'atmosphère et de l'océan sur des échelles de temps de milliers voir de centaines de milliers d'années, comprendre la relation entre la composition des gaz et cendres injectées et la taille de l'aérosol stratosphérique paraît déterminant. Il faut aussi pouvoir déterminer les quantités d'espèces émises qui sont de nature à détruire l'ozone stratosphérique.

## Impacts sur l'océan

Le volcanisme modifie aussi les températures de l'océan. Des simulations numériques réalisées à partir du modèle américain CM2.1 du laboratoire de dynamique des fluides géophysiques montrent que les diminutions du contenu en chaleur de l'océan global induites par les

éruptions du Tambora et du Pinatubo furent les plus fortes du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Le refroidissement simulé de l'océan est de  $1^\circ\text{K}$  pour le Tambora et de  $0,4^\circ\text{K}$  pour le Mont Pinatubo, avec un pic 3 ans après l'éruption. A nouveau, en conséquence du manque d'observations, la réponse dynamique et thermodynamique de l'océan reste relativement étudiée à l'aide de simulations numériques. L'anomalie négative de température se propage depuis la surface jusque dans les couches plus profondes de l'océan (2 000 à 3 000 m) et persiste durant une à deux décennies après l'éruption. En région tropicale, on observe au contraire un réchauffement des températures de subsurface (10 à 100 m) qui refléterait une diminution de l'intensité des vents. Ces perturbations ont un impact sur la circulation océanique de grande échelle, composante la plus lente du système climatique dont la réponse se fait sur des constantes de temps de l'ordre de plusieurs décennies au siècle.



Fig. 2 – Eruption du Pinatubo. Source <http://www.usgs.gov> © Hoblitt ■

Au refroidissement de l'océan s'ajouterait une réduction des précipitations aux hautes latitudes, donc un accroissement de la salinité des eaux de surface. Plusieurs modèles de climat suggèrent que ces modifications des champs de température et de salinité concourent à intensifier la circulation océanique méridienne moyenne, mais ce résultat n'est pas détecté dans tous les modèles. Les interactions entre troposphère et stratosphère pourraient également jouer un rôle dans le renforcement de la circulation océanique méridienne. Le réchauffement induit par l'absorption du rayonnement solaire par l'aérosol volcanique aux basses latitudes modifie le gradient de géopotential entre les pôles et l'équateur et renforce le vortex polaire. Les jets troposphériques sont ainsi déplacés

vers les pôles, les vents de la basse troposphère s'intensifient et accentuent la plongée d'eaux aux hautes latitudes. Cependant, en règle générale les modèles climatiques actuels ne représentent pas correctement les processus stratosphériques et ont tendance à sous-estimer la variabilité de la circulation atmosphérique et sa réponse au forçage volcanique. Enfin la glace de mer est également

sensible au forçage volcanique. On détecte un accroissement du couvert et du volume de glace de mer en hiver environ 5 ans après les éruptions, conséquence directe du refroidissement océanique.

Pour conclure, alors que le temps de relaxation des perturbations atmosphériques dues aux grandes éruptions volcaniques est de l'ordre de quelques années, le temps de retour de l'océan profond (T, S et circulation) à un état non perturbé serait de l'ordre de plusieurs décennies au siècle. Ceci signifie que les effets des éruptions volcaniques majeures du XX<sup>e</sup> siècle sont susceptibles d'avoir atténué le réchauffement global actuel, et plus particulièrement au cours de la deuxième moitié du siècle, et doivent donc être pris en compte dans les simulations globales de l'évolution future du climat. Cela implique aussi que l'on peut s'attendre à des effets cumulatifs importants dans le cas de séquences d'éruptions rapprochées (*e.g.* milieu du XIII<sup>e</sup> siècle) ou, pire, lors des méga-éruptions comme celles du Toba (Indonésie, - 76 000 ans, VEI = 8) ou de Yellowstone (USA, - 640 000 ans, >1000 km<sup>3</sup>).

### Références bibliographiques

- M. BARONI, M. H. THIEMENS, R. J. DELMAS and J. SAVARINO - *Mass-Independent Sulfur Isotopic Compositions in Stratospheric Volcanic Eruptions*. *Science*, 315, 2007.
- A. ROBOCK - *Volcanic eruptions and climate*, *Reviews of Geophysics*, 38, 2000.
- G. STENCHIKOV, T. L. DELWORTH, V. RAMASWAMY, R. J. STOUFFER, A. WITTENBERG, and F. ZENG - *Volcanic signals in oceans*, *J. Geophys. Res.*, 114, 2009.