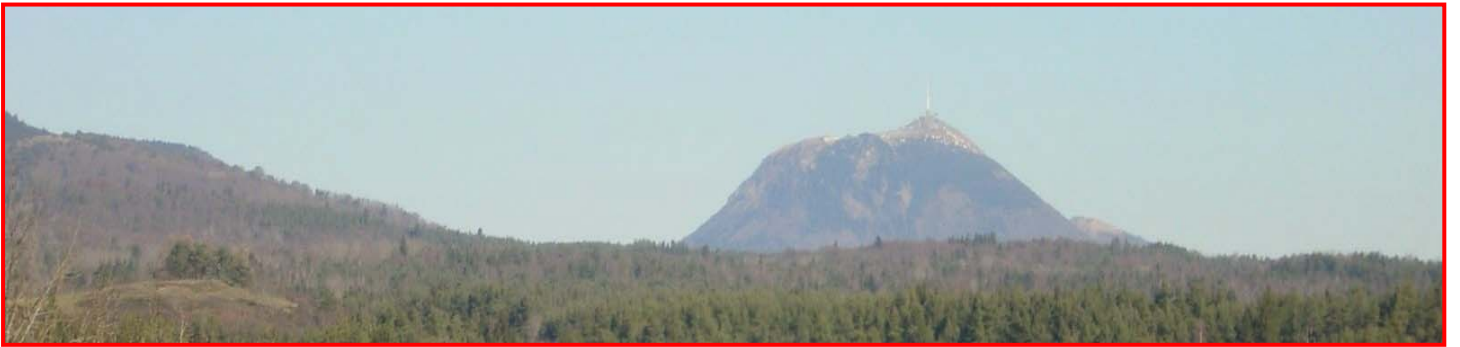


ORE-BEAM

Biophysicochimie de l'Eau Atmosphérique et Modifications anthropiques



Nuages et vues panoramiques du Puy de Dôme et du Lac d'Aydat, J.L. Barthout, UMR 6016

OPGC Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, OSU, UMS 833
LaMP Laboratoire de Météorologie Physique, UMR CNRS 6016
LBCP Laboratoire de Biologie Comparée des Protistes, UMR CNRS 6023
LPMM Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macromoléculaire, UMR CNRS 6505
SEESIB Laboratoire de Synthèse Et Etude de Systèmes à Intérêt Biologique, UMR CNRS 6504

Visas des organismes de tutelle

OPGC

date

signature

**Université
Blaise Pascal**

date

signature

INSU

date

signature

Résumé

L'objectif de l'ORE *Biophysicochimie de l'Eau Atmosphérique et Modifications anthropiques* (ORE-BEAM) est de documenter et de quantifier l'impact de modifications environnementales d'origine anthropique :

- **sur le transfert et la transformation d'espèces chimiques dans l'eau atmosphérique et ses conséquences sur le climat,**
- **sur la composition chimique de la troposphère,**
- **sur la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes et impact sur un milieu aquatique récepteur.**

L'ORE-BEAM a pour originalité de fédérer des laboratoires mixtes CNRS/Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) impliqués dans l'étude de l'eau pour aborder de façon pluridisciplinaire les problèmes posés par les interactions entre l'eau atmosphérique et l'environnement :

- L'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand,
- Le Laboratoire de Météorologie Physique,
- Le Laboratoire de Biologie Comparée des Protistes,
- Le Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macromoléculaire,
- Le Laboratoire de Synthèse Et Etude de Systèmes à Intérêt Biologique.

L'ORE-BEAM proposera de documenter et de comprendre les processus d'évolution de l'eau atmosphérique sous l'influence des activités humaines en observant l'entité eau atmosphérique (au sommet du puy de Dôme), de sa formation aux précipitations et à son intégration à un écosystème lacustre récepteur (le lac d'Aydat).

L'ORE-BEAM sera originellement organisé autour de quatre thématiques scientifiques portant sur la **susceptibilité des nuages** aux variations environnementales et leur impact sur le climat, sur les **processus de transformation des espèces chimiques** en phase hétérogène et leur impact sur la capacité oxydante de la troposphère (l'eau atmosphérique comme réacteur chimique, la photo-transformation de composés d'intérêt atmosphérique en phase liquide et/ou glace), **la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes** et enfin, **le développement de nouveaux capteurs** pour l'eau atmosphérique et ses composants physiques, chimiques et biologiques. Chacune de ces quatre thématiques sera abordée sous un angle pluridisciplinaire favorisant des actions transversales à la fois au niveau de l'observation des phénomènes, de leur documentation et de la compréhension scientifique des processus.

L'ORE-BEAM est bien inséré dans le tissu de la recherche :

- Au plan régional, où les objectifs scientifiques de l'ORE-BEAM se situent en amont d'un GIS (RAMEAU) en interaction avec le BRGM et l'OIEAU notamment
- Au plan national, par la participation des partenaires dans plusieurs ACIs et programmes du CNRS et du Ministère de l'Environnement.
- Au plan international, par l'interaction des partenaires avec des réseaux d'observation tels que RAMCES.

Une partie du service d'observation existe déjà dans le cadre de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) sur un des thèmes majeurs en Sciences de l'Atmosphère qui concerne l'impact des gaz anthropiques et des aérosols sur la composition chimique de l'atmosphère globale ou sur la qualité de l'air à l'échelle locale au site atelier du sommet du puy de Dôme. Le service d'observation a un objectif double : contribuer à des réseaux existants d'observations de l'environnement et constituer un site d'observations pilote favorisant l'accueil d'expériences nationales et internationales sur l'étude des nuages.

L'ORE-BEAM se propose de compléter les activités existantes au sein de l'OPGC, à la fois au niveau de **l'analyse régulière** des propriétés physiques, chimiques et biologiques des nuages et des précipitations mais également en regroupant et développant des **études pilotes**, interdisciplinaires, et ciblées destinées à comprendre les mécanismes de l'impact anthropique dans l'eau atmosphérique naturelle et les conséquences sur les milieux récepteurs.

Au-delà d'un rôle de qualification des outils de modélisation, l'évolution prévue du service consistera à fournir des observations d'intérêt majeur pour la connaissance et la hiérarchisation in-situ des différents processus physiques, chimiques et biologiques.

L'ORE-BEAM va documenter, caractériser et quantifier les propriétés de l'eau sous l'influence des activités humaines sous **diverses situations environnementales** :

- périodes hivernales/estivales
- périodes diurnes/nocturnes
- périodes polluées (masses d'air continentales)/peu polluées (masses d'air maritime)
- périodes de fertilisation/non-fertilisation agricole
- périodes de brassage des eaux lacustres.

Ces contrastes vont permettre d'établir la contribution relative de différents effets anthropiques (pollution locale et grande échelle, tourisme, agriculture, rejets accidentels...) sur l'eau. Ils seront documentés par des campagnes intenses bi-annuelles qui viendront compléter les mesures en continu telles qu'elles existent déjà à la station du puy de Dôme et à alimenter **une base de données**.

Les laboratoires susceptibles de bénéficier de ces données sont nationaux et internationaux. Les données générées seront également distribuées sur le site web de l'OPGC et échangées avec des bases de données nationales (ETHER, MEDIAS,...) ou de réseaux (TOR2, RAMCES,...).

Un suivi continu et régulier des propriétés biophysicochimiques de l'eau permettra d'établir des **lois de comportements** de ses propriétés en fonction de paramètres clés tels que la température, la pression, l'ensoleillement,... dans le contexte réaliste de l'expérimentation sur le terrain, suivie d'analyses en laboratoire.

Sur la base des mesures interdisciplinaires effectuées dans le cadre de l'ORE-BEAM, **des activités de modélisation** s'effectueront à différents niveaux : modèles biophysicochimiques qui servent à l'interprétation des données acquises par les échantillonneurs et établissent le lien entre les données de laboratoire et les conditions réelles et variables de terrain, modèles microphysiques détaillés fournissant le spectre dimensionnel des aérosols, des gouttes et des cristaux et utiles à la description des processus biophysicochimiques au sein des nuages et de leur évolution.

Ces travaux de modélisation permettront à plus long terme de développer des paramétrisations de la biophysicochimie au sein des nuages qui pourront être introduites dans des modèles de climat régional où l'évaluation du rôle des nuages dans la composition chimique atmosphérique est actuellement critique (IPCC, 2001).

Ces activités de recherche joueront également un rôle moteur dans le domaine de **la formation** d'étudiants intéressés par les études pluridisciplinaires de l'environnement et de l'eau. Une proposition de mastaire recherche et de DEA est actuellement à l'étude.

En complément, il faut rappeler que le site du puy de Dôme est un haut lieu touristique, qui a acquis sa notoriété au sein de la communauté scientifique bien avant la création de l'Observatoire (1871) avec la fameuse expérience de Blaise Pascal en 1648. Un projet d'espace muséographique est actuellement en cours pour le chalet de l'OPGC, mis en œuvre par le Conseil Général du Puy de Dôme et l'Université Blaise Pascal, qui mettrait en scène « l'histoire scientifique du puy de Dôme à travers les expériences de Blaise Pascal ». **Des activités pédagogiques** de sensibilisation et d'information sont prévues dans ce cadre pour tous publics (scolaires, enseignants, techniciens, élus,...) à l'aide d'initiatives du type CPIE (Centres Permanents d'Initiatives Pour l'Environnement).

A plus long terme, les données générées par l'ORE-BEAM devraient trouver **des utilisateurs potentiels** intéressés par des domaines tels que l'agriculture, la gestion des ressources en eau, la dégradation des monuments historiques par les bactéries et les espèces chimiques acides, ... Un intérêt plus prospectif pour le transport et la redistribution de bio-aérosols, vecteurs de bactéries et virus, notamment dans des pays comme l'Afrique pourrait susciter des applications futures intéressantes des recherches effectuées dans l'ORE-BEAM dans le domaine de la santé.

ORE-BEAM

Table des Matières

OBJECTIFS DE L'ORE-BEAM	1
NOM et CV BREF du RESPONSABLE	1
SERVICE D'OBSERVATION EXISTANT	1
1. Observations systématiques de chimie atmosphérique	2
2. Observations pilotes en physicochimie des nuages	5
3. Moyens humains mobilisés	5
4. Exploitation des données du Puy de Dôme	5
5. Evolution du service	6
CONTEXTE SCIENTIFIQUE	7
1. Introduction	7
2. Les quatre thématiques scientifiques de l'ORE-BEAM	9
2.1. <i>La susceptibilité des nuages aux variations environnementales , implications climatiques</i>	9
2.1.1. Les processus d'activation des noyaux de condensation nuageux	10
2.1.2. La caractérisation des noyaux glaçogènes	12
2.2. <i>Les processus de transfert et de transformation en phase hétérogène et ses implications sur la capacité oxydante de la troposphère</i>	13
2.2.1. La photochimie des milieux aqueux atmosphériques	13
2.2.2. La réactivité en phase hétérogène	14
2.2.3. Les mécanismes du transfert des espèces gazeuses dans les nuages mixtes (liquides et/ou glacés)	15
2.3. <i>Structure et fonctionnement des communautés microbiennes dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations - Impact sur un milieu récepteur</i>	16
2.3.1. Structure des communautés microbiennes dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations	17
2.3.2. Activités potentielles de biodégradation des communautés microbiennes	17
2.3.3. Impact des caractéristiques chimiques et microbiologiques des précipitations sur le fonctionnement d'un écosystème aquatique récepteur (Lac d'Aydat)	18
2.4. <i>Les développements de nouveaux capteurs</i>	20
L'ORGANISATION DE L'ORE-BEAM	22
REFERENCES	22
LIEN AVEC DES PROBLEMATIQUES D'IMPACT ET DE RISQUE	27
GRANDEURS MESUREES	28
1. Observations in-situ	28
2. Analyses en laboratoire	28
PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	30
PLANNING ANNUEL DES OBSERVATIONS	33
STRUCTURE SCIENTIFIQUE RESPONSABLE PRINCIPALE ET GESTIONNAIRE	34
UNITES IMPLIQUEES ET ORGANISMES ASSOCIES	34
MOYENS MATERIELS ET FINANCIERS	35

MOYENS HUMAINS	36
BANQUES DE DONNEES	37
INSERTION DE L'ORE DANS LE TISSU DE LA RECHERCHE	38
ARTICULATION AVEC DES OBSERVATOIRES OPERATIONNELS	38
EXPLOITATION ET VALORISATION ATTENDUE DES DONNEES	39
1. Une base de données ouverte aux utilisateurs	39
2. Des activités de modélisation	39
3. Des activités de formation et de sensibilisation	39
4. Des études d'impact	39
PUBLICATIONS ET THESES DES EQUIPES IMPLIQUEES	40

OBJECTIFS DE L'ORE-BEAM

L'objectif de l'ORE *Biophysicochimie de l'Eau Atmosphérique et Modifications anthropiques* (ORE-BEAM) est de documenter et de quantifier l'impact de modifications environnementales d'origine anthropique :

- sur le transfert et la transformation d'espèces chimiques dans l'eau atmosphérique et ses conséquences sur le climat,
- sur la composition chimique de la troposphère,
- sur la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes et impact sur un milieu aquatique récepteur.

L'ORE-BEAM a pour **originalité** de fédérer divers laboratoires impliqués dans l'étude de l'eau pour aborder de façon pluridisciplinaire les problèmes posés par les interactions entre l'eau atmosphérique et l'environnement. Il proposera de documenter et de comprendre les processus d'évolution de l'eau atmosphérique sous l'influence des activités humaines en observant l'entité eau atmosphérique, de sa formation aux précipitations et à son intégration à un écosystème lacustre récepteur.

L'ORE-BEAM sera originellement organisé autour de quatre thématiques scientifiques portant sur la **susceptibilité des nuages** aux variations environnementales et leur impact sur le climat, sur les **processus de transformation des espèces chimiques** en phase hétérogène et leur impact sur la capacité oxydante de la troposphère (l'eau atmosphérique comme réacteur chimique, la photo-transformation de composés d'intérêt atmosphérique en phase liquide et/ou glace), **la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes** et enfin, **le développement de nouveaux capteurs** pour l'eau atmosphérique et ses composants physiques, chimiques et biologiques. Chacune de ces quatre thématiques sera abordée sous un angle pluridisciplinaire favorisant des actions transversales à la fois au niveau de l'observation des phénomènes, de leur documentation et de la compréhension scientifique des processus.

NOM et CV BREF du RESPONSABLE

Andrea I. Flossmann : Andreea Flossmann est professeur à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) depuis 1993 et directeur adjoint du LaMP (Laboratoire de Météorologie Physique), Unité Mixte 6016 du CNRS. Au sein de ce laboratoire, elle dirige l'équipe " Processus Physico-chimique dans les nuages" et elle est membre nommé du comité national section 12 du CNRS. Elle a obtenu son PhD à l'Université de Mayence en Allemagne en 1987 et a effectué plusieurs séjours aux Etats Unis au NCAR et à l'UCLA.

Elle travaille sur les processus dynamiques, microphysiques et chimiques dans les nuages. Elle a publié plus de 30 articles dans des revues de rang A, et environ 50 autres publications. Elle a des responsabilités dans nombreux comités nationaux et internationaux et fait partie du comité éditorial de 3 revues scientifiques internationales.

Elle a coordonné le projet CIME (Cloud Ice Mountain Experiment) dans le 4^{ème} PCRD qui a réuni 4 laboratoires pour des expériences au sommet du Puy de Dôme.

SERVICE D'OBSERVATION EXISTANT

Une partie du service d'observation existe déjà dans le cadre de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) sur un des thèmes majeurs en Sciences de l'Atmosphère qui concerne l'impact des gaz anthropiques et des aérosols sur la composition chimique de l'atmosphère globale et sur la qualité de l'air à l'échelle locale au site atelier du sommet du puy de Dôme. Le service d'observation a un objectif double : contribuer à des réseaux existants d'observations de l'environnement et constituer un site d'observations pilote favorisant l'accueil d'expériences nationales et internationales sur l'étude des nuages.

1. Observations systématiques de chimie atmosphérique

La station du puy de Dôme (Figure 1) est un des rares sites non urbains en France où sont effectuées des mesures en continu d'espèces gazeuses, comme l'ozone, le CO₂, ou particulaires comme le carbone-suie. De part sa disposition géographique et son altitude, la station du puy de Dôme est

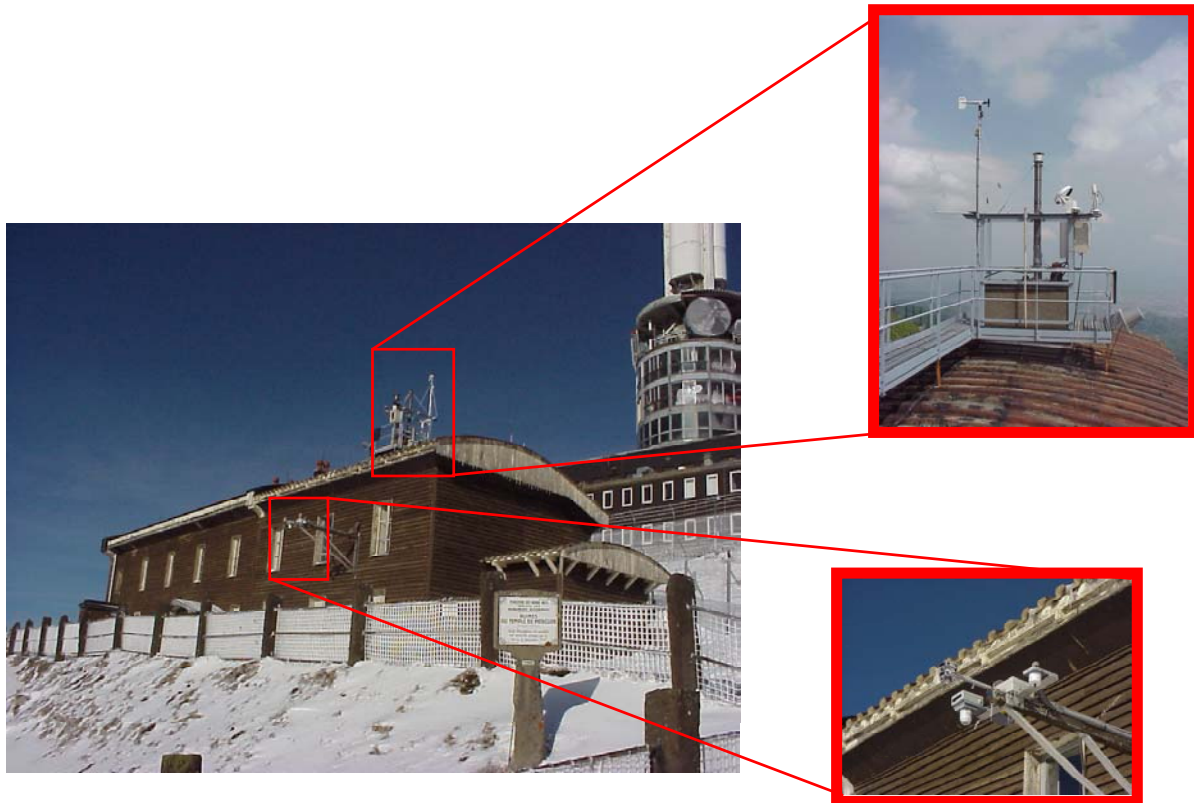


Figure 1 : Vue du chalet et des capteurs de mesures sur le toit (vue en haut, à droite), et sur un mât situé en façade (vue en bas, à droite).

éloignée des sources locales de pollution et se trouve, une grande majorité du temps en situation de troposphère libre. Les mesures effectuées à la station ont permis de mettre en évidence les apports longue distance extra-régionaux de type marin, continental, anthropique et désertique. Il s'agit donc d'une station dont la représentativité spatiale est très étendue qui trouve naturellement sa place dans plusieurs réseaux d'observation de l'atmosphère.

Les mesures continues sont en effet effectuées dans le cadre de réseaux internationaux, comme TOR2 (Tropospheric Ozone Research) pour l'ozone, et RAMCES (Réseau Atmosphérique de Mesure des Composés à Effet de Serre) pour le CO₂, et devrait prochainement s'intégrer au réseau MOZART de suivi des composés troposphériques au sol, complémentaire du système MOZAIC de mesures systématiques sur les avions de ligne AIRBUS. La station contribue également au projet européen de coordination des mesures des propriétés physiques et chimiques des particules mis en place par le centre européen de recherche d'ISPRA et soutenu dans le cadre d'EUROTRAC2 et par l'organisation mondiale de la Météorologie (WMO).

Le Tableau ci-dessous est la liste exhaustive des mesures effectuées à la station en 2002. Certaines mesures, qui seront intégrées à la station au cours de l'année 2002, sont aussi indiquées.

Type de Mesure	Paramètre Mesuré	Abbréviation	Résolution temporelle	Laboratoire	Réseau	Statut
METEOROLOGIE	Rayonnement UV	RUV	15min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Rayonnement visible	Rv	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Rayonnement diffus	Rd	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Vent vitesse	Vv	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Vent direction	Vd	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Température	T	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Pression	P	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Humidité relative	RH	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Taux de photolyse de NO2	JNO2	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
Profilleur de vent	ST-Radar	15 min	LaMP/OPGC		en fonctionnement	
GAZ	Ozone	O3	15min	LaMP/OPGC	TOR2	en fonctionnement
	Ozone	O3	15min	Atmo-Auvergne	ADEME	en fonctionnement
	Dioxyde de Soufre	SO2	15min	LaMP/OPGC		en fonctionnement
	Dioxyde de carbone	CO2	15min	LSCE-Gif/Yvette	RAMCES	en fonctionnement
	Monoxyde de carbone	CO	15min	LaMP/OPGC	TOR2	en fonctionnement
	Monoxyde de carbone bas niveaux	CO	15min	LSCE-Gif/Yvette	MOZART	mise en place prévue en Avril 2002
	Dioxyde d'azote	NO2	15min	Atmo-Auvergne	ADEME	en fonctionnement
	Monoxyde d'azote	NO	15min	Atmo-Auvergne	ADEME	en fonctionnement
	Oxydes d'azote bas niveaux	NOy	15min	LaMP/OPGC	TOR2	mise en place prévue en Juin 2002
	Isotopes du carbone	14C,13C	1 semaine	LSCE-Gif/Yvette	RAMCES	en fonctionnement
	Chlorofluorocarbones	CFC	1 semaine	Université de Bern	RAMCES	en fonctionnement
	Formaldéhyde	HCHO	1 semaine	LaMP/OPGC		mise en place prévue en Juin 2002
	Peroxyde d'Hydrogène	H2O2	15min	LaMP/OPGC		mise en place prévue en Juin 2002
Spéciation Mercure	Hg0	15min	LGGE-Grenoble		arrêté en Juin 2001 redémarrage prévu en Juin 2002	
AEROSOL	Carbone-suie	BC	15min	LaMP/OPGC	AEROSOL	en fonctionnement
	Composés organiques solubles	WSOC	1 semaine	CNR-Bologne	AEROSOL	en fonctionnement
	Composés organiques particulaires	EC/OC	1 semaine	JRC-Ispra	AEROSOL	en fonctionnement
	Composés inorganiques particulaires	IC	1 semaine	LGGE-Grenoble	AEROSOL	en fonctionnement
	Composés traces particulaires	PIXE	1 semaine	Université Modène	AEROSOL	en fonctionnement
	Spéciation organique particulaire	EC/OC	1 semaine	LGGE-Grenoble	CARBOSOL	mise en place prévue en Juin 2002
	Spectre dimensionnel des particules	dN/dlogD	15min	LaMP/OPGC	AEROSOL	en fonctionnement
	Nombre de particules	CN	15min	LaMP/OPGC	AEROSOL	en fonctionnement
	Radon	Rn	1min	LSCE-Gif/Yvette	RAMCES	mise en place prévue en Juin 2002
	Radon	Rn	1min	Université d'Heidelberg	RAMCES	mise en place prévue en Juin 2002
	Epaisseur optique des aérosols	τ	15min	LOA-Lille	AERONET	arrêté novembre 2001

Tableau 1 : Liste des mesures effectuées en continu à la station du Puy de Dôme. Etat de fonctionnement en 2002.

Un effort important a été entrepris au cours des 5 dernières années pour la validation des mesures effectuées à la station : mise en place de prises d'entrée d'air calibrées, installation de systèmes de dégivrage automatiques, limitation du risque de foudroiement et des problèmes d'alimentation électrique. Cet effort permet, depuis 1999, de travailler avec un taux de fonctionnement des appareils supérieur dans l'année à 85%. Ceci correspond aux objectifs fixés pour des réseaux de mesure de qualité de l'air en zone urbaine pour lesquelles les conditions environnementales et l'accessibilité ne sont bien sûr pas comparables.

Nous pouvons illustrer ces mesures par les variations inter-annuelles de l'ozone troposphérique depuis 1996 (Figure 2) qui montrent clairement les maxima saisonniers au printemps-été, sous l'effet de phénomènes photochimiques.

Le travail sur les données du puy de Dôme intègre également des mesures plus élaborées comme celles concernant les caractérisations des distributions en masse et la composition chimique des aérosols provenant de divers types de masses d'air (Figure 3).

De fait, la station du puy de Dôme est, en France, la station opérationnelle la plus équipée au niveau instrumental pour les mesures en continu de gaz et de particules.

Evolution du taux d'ozone au sommet du puy de Dôme
1995 - 2001

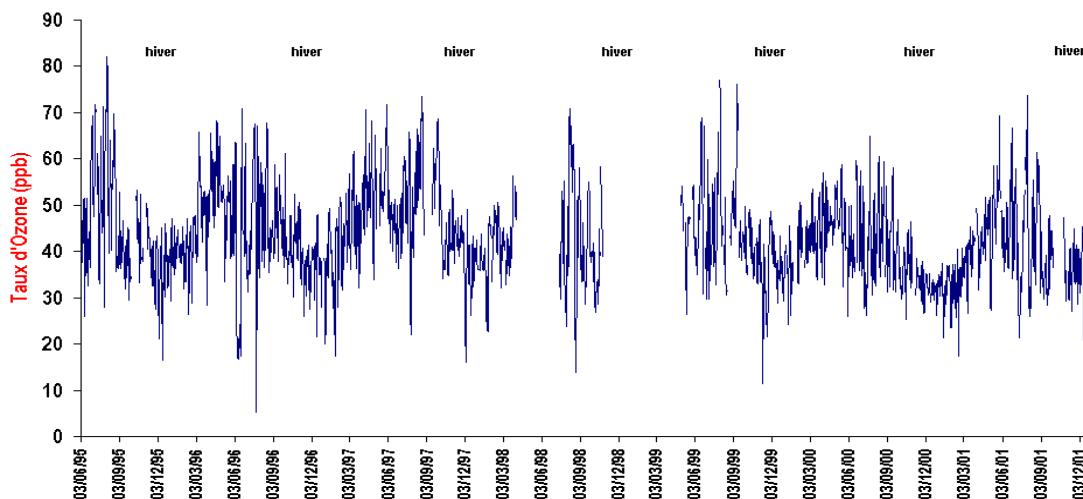


Figure 2: Variations de l'ozone à la station puy de Dôme depuis 1995.

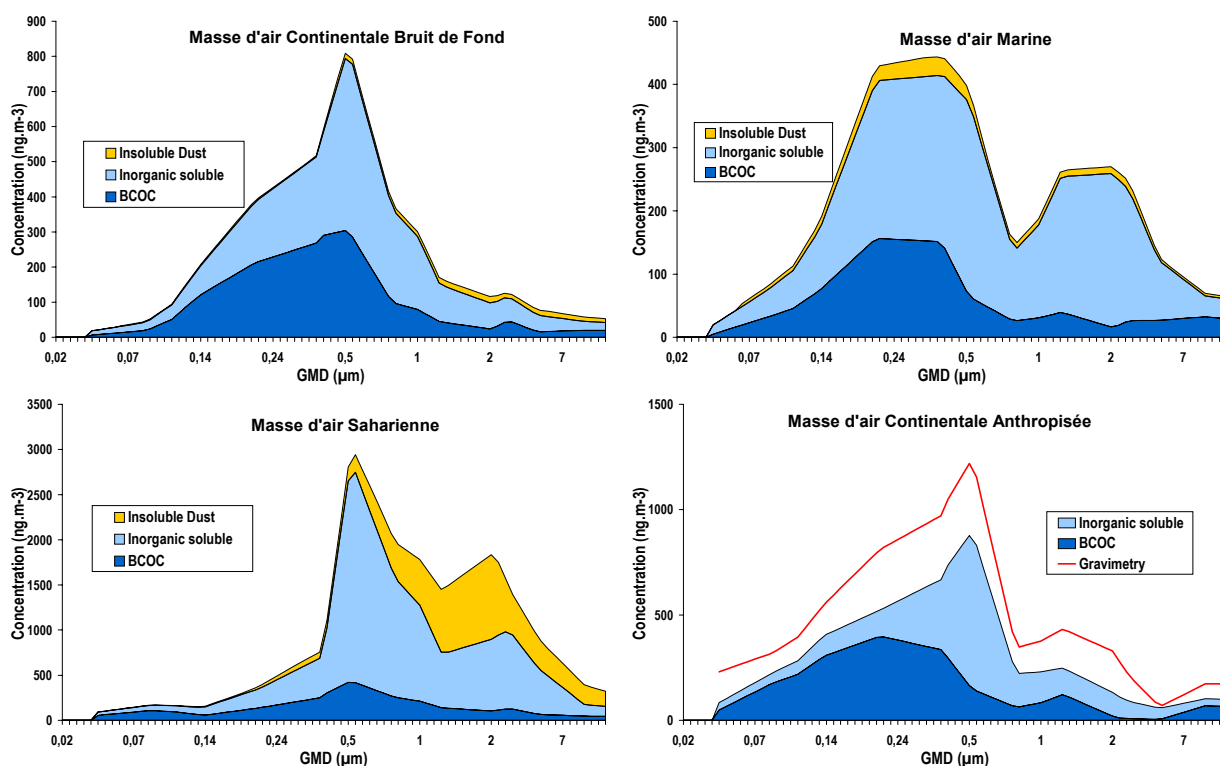


Figure 3: Distribution dimensionnelle en masse et composition chimique des aérosols provenant des divers types de masse d'air à la station du puy de Dôme (Sellegri et al., 2002a).

2. Observations pilotes en physicochimie des nuages

La station du puy de Dôme est également caractérisée par la formation fréquente de nuages présents, en moyenne annuelle, plus de 30% du temps. La situation géographique de la station comme première chaîne de montagnes rencontrée par les flux d'ouest, la variété des situations nuageuses rencontrées à son altitude intermédiaire de 1465m (nuages orographiques, frontaux, convectifs, nuages chauds et/ou froids, masses d'air polluée ou non,...), la présence d'une soufflerie de recherche permettant le test et la mise au point d'instrumentation aéroportée, par l'ensemble des dispositifs disponibles permettant une caractérisation complète des nuages observés en font donc un site privilégié d'études des nuages dans la troposphère.

Depuis 2001, la station du puy de Dôme est reconnue comme laboratoire national pour l'étude des systèmes nuageux. L'intérêt de la station pour l'étude des processus multiphasiques dans l'atmosphère est également reconnue internationalement comme le prouvent les récentes collaborations dans le cadre des projets européens CIME (1996-1998) sur les nuages glacés, CARBOSOL (2001-2003) sur les aérosols carbonés ou de la campagne Puy de Dôme/PNCA (Programme National de Chimie Atmosphérique de l'INSU) qui se sont déroulées durant les hivers 2000 et 2001 (PDD2000 et PDD2001). Ces campagnes ont permis, par des mesures intensives et ciblées, de comprendre et modéliser certains processus atmosphériques encore incertains.

Par exemple, la dernière campagne PDD2001 a réuni plusieurs groupes de recherches français, européens et américains autour de plusieurs thématiques scientifiques liées à la caractérisation des aérosols et des gaz et à leur interaction avec la chimie et la microphysique des nuages. Elle a permis, pour la première fois, l'utilisation et la validation de la nouvelle sonde CVI (Counter flow Virtual Impactor) développée au LaMP, unique en France, permettant l'échantillonnage des noyaux de condensation des gouttelettes de nuages. Les objectifs principaux étaient de procéder à une caractérisation la plus complète possible des particules d'aérosols, de leurs propriétés hygroscopiques, de leur comportement dans les systèmes nuageux et d'évaluer leur impact sur la chimie du nuage, en particulier en relation à la présence de composés organiques volatils.

Les mesures mises en place au cours de ces campagnes sont listées dans le Tableau 2. Elles ont donné lieu à un certain nombre de publications scientifiques, de rapports d'activités et de thèses de doctorat ou de DEA.

La soufflerie de recherche est de plus un lieu de validation idéal pour les sondes embarquées sur avions. Par exemple, la sonde isocinétique AVIRAD avant son utilisation dans le cadre des projets européens CAATER, ou les nouveaux matériels utilisés par EADS et par AUXITROL ont été préliminairement testés à la station du puy de Dôme.

3. Moyens humains mobilisés:

mesures systématiques : 1 chercheur, 3 ITA/IATOS (1IR, 1 IE, ½ Tech)

station de chimie hétérogène, campagnes: 2 chercheurs, 4 ITA/IATOS (1IR, 1IE, ½ Tech)

base de données : ½ IE informatique, 1 AI informatique.

4. Exploitation des données du puy de Dôme

Les données du puy de Dôme sont actuellement mises à la disposition de la communauté sous la forme de tracés graphiques de l'évolution temporelle de chaque paramètre, et d'un catalogue de disponibilité des données, accessibles sur le site Web du LaMP/OPGC : www.obs.univ-bpclermont.fr.

Elles sont complétées par des mesures, à la résolution temporelle de 1min, du taux de précipitation sur le site du campus universitaire des Cézéaux depuis 1994 et des mesures des trois composantes du vent et de la température du système radar ST/RASS à Opme depuis fin 1998.

De plus, un utilisateur autorisé peut extraire toutes ou partie des données qui l'intéressent, en réalisant éventuellement des moyennes de tout type, en recherchant des valeurs extrêmes, ou en les synchronisant avec d'autres types de données de la base (données de la station du puy de Dôme, avec les données du radar ST, des pluviomètres, etc). Ces données extraites peuvent être relues par des logiciels types permettant leur utilisation scientifique (voir détails dans la section «banque de données»).

Type de Mesure	Paramètre Mesuré	Résolution Temporelle	Laboratoire	Campagne	Référence
MICROPHYSIQUE	Spectre dimensionnel des gouttes	1 Hz	LaMP/OPGC	CIME/PDD2001	Mertes et al., 2001, Schwarzenböck et al., 2001
	Spectre dimensionnel des cristaux	1 Hz	LaMP/OPGC	CIME/PDD2001	Mertes et al., 2001, Schwarzenböck et al., 2001
	Quantité d'eau Liquide	1 Hz	LaMP/OPGC	CIME/PDD2001	Mertes et al., 2001, Dupuy et al., 2000
	Rayon Effectif des gouttes	1 Hz	LaMP/OPGC	CIME/PDD2001	Dupuy et al., 2000
	Surface effective des gouttes	1 Hz	LaMP/OPGC	CIME/PDD2001	
	Mesure des charges	1 Hz	MPI Heidelberg	PDD2001	Wilhelm, 2002
	Indicatrice de diffusion	1 Hz	LaMP/OPGC		Gayet et al., 1998
	Spectroscopie givrage	1 Hz	AUXITROL SA	1998	Gayet et al., 1998
	Sonde givrage	1 Hz	AIRBUS	2001	
	H2O vapeur	1 Hz	LSP-Grenoble		Romanini et al., 2002
GAZ	Chambre à nébulisation	15 min	LGGE-Grenoble	CIME/PDD2001	Voisin et al., 2000, Sellegri et al., 2002b
	Ammoniac	1 min	ECN-Petten	CIME	Laj et al., 2001
	Dioxyde de soufre bas niveau	1 min	ECN-Petten	CIME	Flossmann, 1999
	Formaldéhyde	1 min	LaMP/OPGC	CIME	Flossmann, 1999
	Peroxyde d'hydrogène	1 min	CNR-Bologne	CIME/PDD2001	Laj et al., 2001
	Acide nitrique	1 min	ECN-Petten	CIME	Flossmann, 1999
	Spéciation Mercure	15 min	LGGE-Grenoble	PDD2001	
AEROSOL	Chambre CCN	15 min	Université Wyoming	PDD2001	Petters et al., 2001
	Distribution dimensionnel en masse	24 heures	LaMP/OPGC	PDD2001	Sellegri et al., 2002b
	Taux de fractionnement des particules en masse	24 heures	LaMP/OPGC	AEROSOL	Sellegri et al., 2002a
	Taux de fractionnement des particules en nombre	15 min	Université Modène	AEROSOL	Gérémy et al., 2000, Dupuy et al., 2000
	Analyse surface Aérosol	3 heure	Université Bologne	CARBOSOL	Andracchio, 2002
	Spectre dimensionnel des particules	15 min	IFT-Leipzig	AEROSOL	Gérémy et al., 2000, Wobrock et al., 2001, Schwarzenböck et al., 2001
	Nombre de particules	15 min	LaMP/OPGC	CIME/PDD	Dupuy et al., 2000
	Masse des aérosols	24 heures	LaMP/OPGC	PDD2001	Sellegri et al., 2002a
	Spéciation du Mercure	1 min	LGGE-Grenoble	PDD2002	Gauchard, 2002
	Spéciation du Fer	15 min	LPMM	PDD2001	Marinoni et al., 2001
PRISES D'ENTREE D'AIR CALIBREES	Prise d'entrée d'air CVI > 5µm		LaMP	CIME/PDD2001	Schwarzenböck et al., 2001, Vocourt et al., 2000
	Prise d'entrée d'air RJI < 5µm		LaMP	CIME/PDD2001	Schwarzenböck et al., 2001, Vocourt et al., 2000
	Prise d'entrée d'air Totale <20µm		LaMP	CIME/PDD2001	Dupuy et al., 2000
	Impacteur à gouttelette métaux		LaMP	CIME/PDD2001	Marinoni et al., 2001
	Impacteur à gouttelettes IC		LaMP	CIME/PDD2001	Voisin et al., 2000, Sellegri et al., 2002b
	Impacteur à gouttelettes haut volume		LaMP	CIME/PDD2002	

Tableau 2 : Liste des mesures effectuées lors de campagnes intensives au sommet du puy de Dôme.

Sur la base des mesures dynamiques, microphysiques et chimiques effectuées au puy de Dôme et sur les autres sites, des activités de modélisation sont effectuées au LaMP/OPGC à différents niveaux : *modèles chimiques* qui servent à l'interprétation des données acquises par les échantillonneurs et établissent le lien entre les données cinétiques de laboratoire et les conditions réelles et variables de terrain, *modèles microphysiques* détaillés fournissant le spectre dimensionnel des aérosols, des gouttes et des cristaux et utiles à la description des processus physicochimiques au sein des nuages et de leur évolution.

Ces travaux de modélisation permettront à plus long terme de développer des paramétrisations de la chimie multiphase et hétérogène au sein des nuages qui pourront être introduites dans des modèles de climat régional où l'évaluation du rôle des nuages dans la composition chimique atmosphérique est actuellement critique (IPCC, 2001).

5. Evolution du service

L'ORE proposé se fonde sur les activités existantes au sein de l'OPGC en se proposant de les compléter, à la fois au niveau de l'analyse en continu des propriétés physiques, chimiques et biologiques des nuages et des précipitations mais également en regroupant et développant des études pilotes, interdisciplinaires, et ciblées destinées à comprendre les mécanismes de l'impact anthropique dans l'eau atmosphérique naturelle et les conséquences sur les milieux récepteurs.

Au-delà d'un rôle de qualification des outils de modélisation, l'évolution prévue du service consistera à fournir des observations d'intérêt majeur pour la connaissance et la hiérarchisation in-situ des différents processus physiques, chimiques et biologiques. Des campagnes bi-annuelles seront organisées en vue de cerner et quantifier les processus pour différentes situations types, fondées sur les contrastes saisonniers, diurnes et influencés par l'impact anthropique.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

1. Introduction

L'eau douce est une des ressources fondamentales sur laquelle repose la plupart des activités de l'Homme et son développement. Base de l'alimentation, source d'énergie renouvelable, lieu de vie et de paysages, elle est présente et nécessaire à tous les niveaux de la société. L'eau douce, que l'on a longtemps cru inépuisable, est le fruit d'interactions complexes dans le système Terre-Atmosphère et, faute de n'avoir pas su en apprécier la dynamique, les activités de l'Homme pourraient, à brève échéance, modifier de manière substantielle et durable, l'accessibilité de tous à cette ressource. Pollution des lacs, des rivières et des nappes phréatiques, modification des bilans hydriques sur des grandes échelles temporelles et spatiales, acidification des pluies, épisodes de précipitations intenses, inondations, sécheresse et désertification, **l'Homme semble pouvoir affecter de manière notable le rôle, la production et le stockage de cette ressource** sans qu'il soit toujours possible et légitime d'identifier des relations de cause à effet entre ces activités et une perturbation du cycle de l'eau dans la biosphère.

La maîtrise par l'Homme de cette ressource est pourtant nécessaire et déterminante dans le développement socio-économique d'une société. Le contrôle de la qualité de l'eau, la gestion des ressources et des conflits d'usage, le transport et la distribution de l'eau potable, l'irrigation et les activités agricoles, les sciences de l'eau, ... font l'objet depuis de nombreuses années d'une attention particulière de la part des pouvoirs publics et des différents acteurs, gestionnaires, distributeurs et usagers de l'eau. En France, à tous les niveaux de la société, des structures ont été mises en place pour permettre de mieux comprendre, évaluer, diagnostiquer, documenter et maîtriser les modifications à venir liées à la gestion technique et sociale de cette ressource. Il est clair qu'une **gestion adéquate doit, dès à présent, prendre en compte les risques futurs** que pourraient induire certaines activités humaines. Il convient donc de mieux comprendre le mécanisme de cette perturbation et mieux diagnostiquer les relations entre les pratiques et leurs conséquences, qu'elles soient locales, régionales ou planétaires.

La chimie atmosphérique a fait l'objet, depuis plusieurs années, d'efforts importants entrepris par la communauté scientifique. Cependant, ces efforts se sont concentrés principalement sur la chimie en phase gazeuse homogène pour laquelle on dispose désormais de modèles opérationnels adéquats (IPCC, 2001 ; Atkinson et coll., 1997a ; 1997b ; 1999 ; 2000). En revanche, les processus chimiques atmosphériques en phase aqueuse homogène ou hétérogène (à la surface des cristaux de glace par exemple) ont été essentiellement étudiés pour faire face à des situations de crise comme le problème des pluies acides ou encore du trou dans la couche d'ozone stratosphérique. **Pourtant, de par leur capacité à capter et dissoudre une grande partie des composés gazeux et particulaires, les gouttelettes de nuages sont un des milieux les plus concentrés et réactifs de l'atmosphère** et un lieu privilégié de l'interaction entre les constituants les plus divers. Le rôle général des nuages dans la composition chimique atmosphérique est cependant encore très mal connu et va intervenir sur trois aspects importants de l'évolution de l'atmosphère planétaire : la modification de la capacité oxydante de l'atmosphère par un forçage chimique sur les concentrations de radicaux (et notamment du radical hydroxyle), la transformation de certaines espèces atmosphériques pouvant amener à la formation de composés secondaires et enfin les taux de lessivage et donc le temps de résidence des espèces solubles.

Les microorganismes jouent un rôle prépondérant dans les flux de matière et d'énergie au sein des écosystèmes par leur abondance et leur diversité taxonomique et fonctionnelle. Ils assurent, souvent exclusivement, des fonctions essentielles, jouant ainsi des rôles clés dans les grands cycles biogéochimiques (cycles de carbone, de l'azote...) et dans les processus de bioremédiation. Par ailleurs, certaines espèces sont capables de se développer dans des milieux aux conditions extrêmes par leurs caractéristiques physico-chimiques (température, pression, acidité, etc...).

L'importance des microorganismes est intimement liée à leurs caractéristiques spécifiques, notamment à leur petite taille facilitant les échanges avec le milieu extérieur et assurant un taux de croissance très élevé, et à la complexité et la diversité de leur métabolisme. De plus, des échanges de gènes rapides et efficaces procurent aux microorganismes une forte capacité potentielle de dispersion et de colonisation et leur permettent de s'adapter rapidement aux variations environnementales.

Au cours de ces dernières années, les progrès réalisés au niveau des techniques d'identification, de

dénombrement et de mesure d'activité métabolique, notamment grâce à la microscopie à épifluorescence et à l'application de techniques de biologie moléculaire, ont permis d'entrevoir l'extraordinaire diversité des microorganismes aquatiques, l'étendue de leurs conditions de vie et leurs abondances jusqu'alors largement sous-estimées.

Il apparaît par ailleurs que la diversité et l'omniprésence des microorganismes révélée par la mise en oeuvre de l'ensemble de ces techniques est en adéquation avec la structure fractale de l'environnement et la relation allométrique inverse qui existe entre, d'une part, la diversité spécifique et l'abondance, et d'autre part, la taille des organismes.

Malgré les progrès considérables réalisés au niveau des méthodes, la tâche à accomplir reste immense. On considère que près de 90 % des microorganismes présents dans l'environnement n'ont pas encore été décrits. La banalisation des techniques de séquençage et l'utilisation conjointe d'approches bio-informatiques d'analyse des génomes et d'approches cellulaires devraient, cependant, donner accès à la phylogénie et à la diversité fonctionnelle des microorganismes.

Les microorganismes représentent la plus grande partie de la diversité du monde vivant et seule la connaissance des relations entre changements environnementaux et changements de la diversité des communautés de microorganismes peut permettre la maîtrise des processus microbiens qui gouvernent le fonctionnement et la pérennité de notre environnement.

C'est dans ce contexte scientifique qu'il est maintenant nécessaire de conduire des études approfondies sur la nature et le rôle des microorganismes présents dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations.

De plus, l'impact des changements globaux sur la biodiversité microbienne et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques est encore très mal apprécié. **Il est donc important de chercher à identifier les conséquences des changements qui affectent le climat et la qualité de l'atmosphère sur la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes, d'une part, dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations, et, d'autre part, au niveau des écosystèmes aquatiques récepteurs.**

Le système Eau-Terre est particulièrement sensible aux perturbations anthropiques dans son réservoir atmosphérique où les échelles de temps caractéristiques correspondent tout à fait à celles de la perturbation anthropique. Qu'il s'agisse des changements climatiques futurs dont la quantification se heurte encore à une mauvaise compréhension du cycle de l'eau atmosphérique et des caractéristiques des nuages, qu'il s'agisse des épisodes de précipitations intenses, du rôle des cristaux de glace dans la destruction de l'ozone stratosphérique ou de la pollution trans-frontière responsable des pluies acides en Europe du nord, les exemples sont nombreux montrant cette extrême sensibilité.

Si des études ont apporté des informations précieuses sur le rôle et le fonctionnement du cycle de l'eau atmosphérique, elles ont également mis en évidence l'extrême complexité d'un système où les conséquences et/ou les rétro-actions positives ou négatives de certaines pratiques dépassent largement les échelles spatiale et temporelle auxquelles elles se produisent. Par conséquent, et en dépit de l'effort entrepris depuis plusieurs années, **de nombreuses questions restent encore à élucider pour quantifier les impacts des activités humaines sur le cycle atmosphérique de l'eau.** Ces questions relèvent de toutes les échelles du système Terre-Atmosphère:

- **A échelle globale**, la quantification du forçage radiatif dû aux modifications de la microphysique des nuages (effet indirect des aérosols), de leur temps de vie ou du processus d'initiation de la précipitation (effets indirects du second ordre) reste la source d'incertitude principale dans la prévision de **l'évolution climatique future**. Il est estimé qu'une variation de 10% de l'albédo moyen des nuages aurait une rétro-action sur le climat du même ordre de grandeur que les gaz à effet de serre mais de signe opposé. Les transformations chimiques dans la phase aqueuse (et solide) atmosphérique régulent également **la capacité oxydante de l'atmosphère et sa composition chimique**. Des études de modélisation montrent qu'une simple variation du taux de lessivage de certaines espèces chimiques peut affecter les bilans atmosphériques de composés comme l'ozone ou les radicaux hydroxyles et par conséquent modifier de manière durable les cycles atmosphériques de l'oxygène, de l'hydrogène ou du carbone.
- **A échelle synoptique et régionale**, la redistribution des espèces chimiques gazeuses ou particulaires (et notamment des espèces produites par les activités anthropiques) est extrêmement sensible à la présence de nuages. Les épisodes d'acidification des précipitations dans les années 1980 ont été amplement documentés. Ils ont clairement montré la sensibilité

des écosystèmes à des processus intervenants à échelle moléculaire mais aussi mis en lumière la difficulté de répondre, par une politique environnementale adaptée à un changement impliquant plusieurs niveaux de responsabilités.

- **A échelle du nuage**, les transformations chimiques ou biologiques dans la phase aqueuse atmosphérique sont extrêmement rapides et efficaces mais encore très mal évaluées en particulier pour de nombreuses espèces organiques qu'elles soient d'origines anthropiques ou naturelles. La méconnaissance des processus de transfert et transformation dans les gouttes et les cristaux sont à la base de l'incertitude sur le rôle global des nuages, à la fois sur le climat et sur la capacité oxydante de la troposphère.

Quelle que soit l'échelle de cet impact anthropique, les études passées ont toutes mis en évidence **la nécessité d'une approche multidisciplinaire et multi-échelles** pour comprendre et résoudre les problèmes posés. Cette synergie entre les communautés des sciences fondamentales, des sciences humaines et des sciences de la vie reste pourtant très limitée bien qu'au plan national, un effort ait été engagé pour favoriser le décloisonnement des structures, des moyens technologiques et humains et des organismes de tutelle de recherche par le biais de programmes interdisciplinaires (PEVS).

L'objectif de l'ORE *Biophysicochimie de l'Eau Atmosphérique et Modifications anthropiques* (ORE-BEAM) est donc de documenter et de quantifier l'impact de modifications environnementales d'origine anthropique :

- **sur le transfert et la transformation d'espèces chimiques dans l'eau atmosphérique et ses conséquences sur le climat,**
- **sur la composition chimique de la troposphère,**
- **sur la structure et le fonctionnement des communautés microbiennes et impact sur un milieu aquatique récepteur.**

Pour cela, de **nouveaux capteurs** pour l'eau atmosphérique et ses composants physiques, chimiques et biologiques seront développés.

2. Les quatre thématiques scientifiques de l'ORE-BEAM

2.1. La susceptibilité des nuages aux variations environnementales : implications climatiques

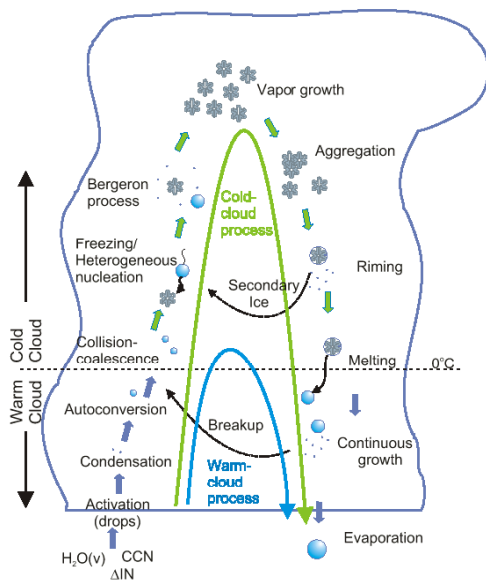


Figure 4: les principaux processus microphysiques dans les nuages.

Les propriétés optiques, chimiques, ou radiatives des nuages résultent d'interactions complexes entre des facteurs dynamiques (turbulence atmosphérique, convection, advection, flux de chaleur), microphysiques (accrétion, coagulation des gouttelettes, givrage, taux de précipitations, etc...) et environnementaux (composition chimique des masses d'air, nombre et composition de particules d'aérosols, etc...). Ces interactions sont illustrées sur la Figure 4 où apparaît la difficulté d'établir des relations de cause à effet entre les divers processus. Une perturbation à la base du nuage (nucléation des gouttelettes) est susceptible de se répercuter à la fois sur l'évolution dimensionnelle des hydrométéores, sur la formation et les caractéristiques des cristaux de glace au sommet du nuage, donc sur ses propriétés optiques (albédo). L'initiation des précipitations et leur intensité, dépendante de l'efficacité du processus de coalescence des gouttes et de la présence de cristaux de glace est lui aussi susceptible d'être influencé par le processus de nucléation. Cependant, ces rétroactions positives ou négatives sont loin d'être linéaires.

Les aérosols d'origine anthropique semblent globalement avoir un contre-effet de serre et ils entreront donc probablement d'ici peu dans le débat

sur l'effet de serre, actuellement concentré sur les effets des émissions de CO₂. S'il est relativement facile de distinguer les perturbations d'origine continentale dans les masses d'air marines lors des expérimentations sur le terrain, l'observation en milieu continental de conditions de référence non perturbées par les activités anthropiques est plus difficile à effectuer. Le forçage radiatif combiné des aérosols et des nuages et ses impacts sur la dynamique atmosphérique et le climat restent donc à être quantifiés avec des modèles complexes permettant de prendre en compte ces divers effets aux conséquences radiatives opposées.

Notre action dans le cadre de l'ORE-BEAM consistera tout d'abord à documenter et comprendre les mécanismes de **la nucléation des gouttes et des cristaux et leur impact sur les propriétés microphysiques des nuages** à la fois par des mesures en continu à la station puy de Dôme et par des actions pilotes destinées à mieux comprendre certains processus. Au fur et à mesure d'une meilleure compréhension de ces mécanismes, les problèmes liés à leur paramétrisation et aux transferts d'échelles seront abordés.

2.1.1 Les processus d'activation des noyaux de condensation nuageux

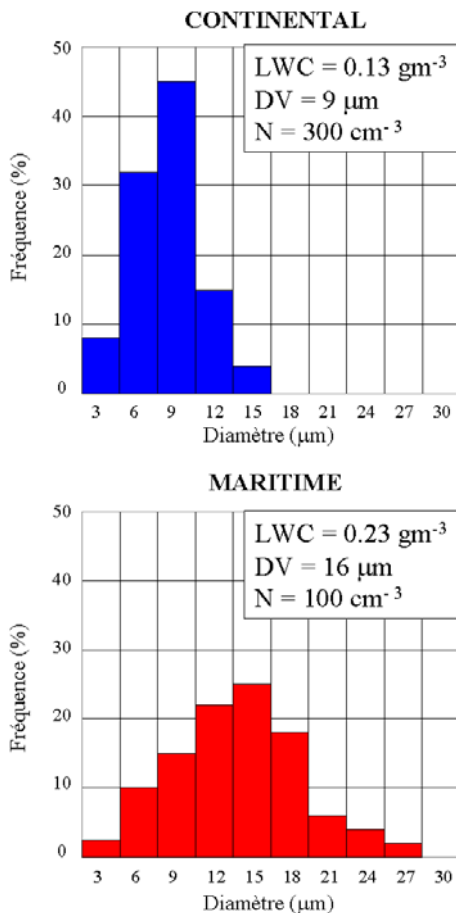


Figure 5: Spectres dimensionnels normalisés des gouttelettes à la station puy de Dôme pour des nuages sous influence continentale (bleu) et marine (rouge).

La connaissance incomplète des mécanismes régissant l'incorporation des espèces chimiques (gaz et aérosols) dans les nuages et les aérosols ainsi que la réactivité de ces espèces en phase hétérogène limite la paramétrisation des transformations des polluants dans les modèles, tant au niveau global qu'à échelle régionale ou locale. Des études récentes montrent pourtant que la prise en compte de l'incorporation dans la phase condensée diminue globalement les concentrations de certaines espèces dans l'atmosphère de 10 à 90% suivant leur solubilité (Lawrence et Crutzen, 1998).

Une des limitations à cette connaissance vient de la difficulté à quantifier l'évolution d'une particule dans la troposphère et son comportement en atmosphère humide. La capacité d'une population de particules à servir de noyaux de condensation des gouttelettes de nuages (CCN) ou de cristaux de glace (IN) (appelée spectre d'activation des CCN ou des IN) est une donnée essentielle pour le développement de paramétrisations réalistes de microphysique et par conséquent de l'albédo des nuages (Leaitch, et al., 1996). Le spectre de nucléation des CCN détermine également la contribution de la phase particulaire à la composition chimique des gouttelettes, donc à son pH et, par conséquent, influe directement sur la dissolution de gaz solubles dans la phase liquide. L'effet d'une variation de la nature des particules d'aérosols sur la microphysique des gouttelettes de nuage est illustré sur la Figure 5, où l'on voit clairement que les nuages continentaux, sous influence anthropique sont constitués de gouttelettes plus petites que les nuages "marins". Cette modification a des répercussions sur la réflectivité du nuage, donc sur son rôle dans le bilan radiatif de la Terre. On estime qu'une variation de 10% du rayon

effectif des nuages marins stratiformes produirait une baisse des températures globale d'environ 2°C. De récentes expériences de fermeture sur le processus d'activation des aérosols ont démontré que les concentrations de gouttelettes (ou concentrations de CCN activés) prédites par les modèles théoriques d'activation sont largement surestimées par rapport aux valeurs de concentration mesurées dans les nuages. Ce défaut affecte aussi bien le modèle théorique que les paramétrisations simplifiées du processus dans les modèles de climat. Le cycle de l'eau atmosphérique, compte tenu de ses

rétroactions potentielles positives et négatives considérables constitue aujourd'hui la source d'incertitude majeure sur l'évaluation du forçage anthropique du climat.

Un effort important a été entrepris, au niveau national et international pour comprendre les processus impliqués dans l'activation des aérosols à partir de données expérimentales. Un certain nombre de campagnes internationales ont eu lieu au cours des 10 dernières années et ont contribué de manière significative à la compréhension des interactions aérosols-nuages dans la troposphère. Les aérosols, noyaux de condensation et acteurs importants du bilan radiatif atmosphérique, jouent un rôle important sur ce cycle. La caractérisation des interactions aérosols-nuages-rayonnement, et la quantification de leurs effets sur la dynamique locale et sur le climat constituent donc un challenge scientifique à moyen terme.

La question est vaste et la communauté scientifique a encore beaucoup à progresser avant que les aérosols ne soient inclus explicitement dans les modèles de circulation générale et de climat, ce qui est l'enjeu à long terme. Des études de processus, focalisées sur le phénomène de l'activation des CCN sont nécessaires.

L'objectif d'une thématique scientifique sur les interactions aérosol-nuages au sein de l'ORE-BEAM consiste donc **à quantifier l'impact des aérosols sur la microphysique des nuages et d'évaluer les implications climatiques via la validation de paramétrisations utilisées dans les modèles.**

Nous proposons de mettre en place un protocole d'étude climatologique des relations entre les propriétés des masses d'air et les propriétés des nuages. Ce protocole basé sur des mesures en continu à la station du puy de Dôme sera complété par des actions pilotes, sous forme de campagnes intensives ciblées ou d'études en laboratoire, destinées à la quantification de certains processus.

L'étude climatologique de la nucléation permettra de disposer d'une statistique robuste sur la relation entre des paramètres « aérosols » (nombre, spectre dimensionnel, composition chimique), des paramètres microphysiques (rayon effectif, quantité d'eau liquide, phase en présence), des paramètres météorologiques (T, RH, pression, vent, etc..), des paramètres radiatifs (radiométrie visible) ainsi que des informations sur la géométrie des nuages (base du nuage, épaisseur optique).

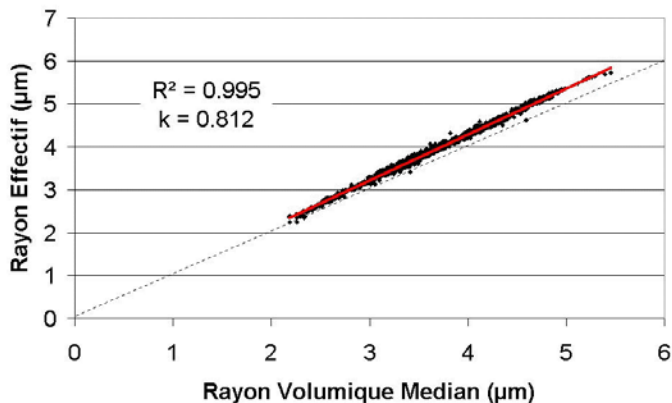


Figure 6 : Validation des paramétrisations de Martin et al., 1999, reliant les rayons effectifs mesurés et calculés à partir des données in-situ .

Des relations empiriques relatives à la microphysique des nuages ont été proposées pour fournir des lois de comportement à intégrer dans les modèles de climat. Par exemple, une analyse statistique sur 18 jours complets de mesures en nuages (plus de 500000 données à 1Hz) a été réalisée au sommet du puy de Dôme pour valider des relations entre R_e , LWC et la concentration en particules utilisées dans des modèles globaux (Dupuy et al., 2000 et Figure 6). Cette analyse a également montré les limitations d'une approche fondée uniquement sur la théorie de Koehler pour prévoir une concentration de gouttelettes dans un nuage.

D'autres relations diagnostiques, à la base des paramétrisations utilisées aux échelles synoptique et globale, peuvent

être évaluées sur des échelles temporelles très longues par la mesure continue des différents facteurs. Nous proposons, à la station du puy de Dôme/Opme d'effectuer les mesures suivantes sur une période de plusieurs années:

- Mesures Microphysiques (contenu en eau, rayon effectif)
- Mesures Aérosols (comptage, spectre dimensionnel, chimie)
- Mesures Aérosols Interstitiels (comptage)
- Mesure Géométrie du nuage (Base du nuage- Epaisseur)
- Mesures chimiques du nuage (inorganique + DOC)
- Mesures météorologiques

Ce dispositif permettra de proposer des relations empiriques entre les principaux facteurs considérés dans les modèles mais aussi d'en évaluer l'évolution due aux variations des conditions environnementales.

Les résultats seront proposés sous forme d'analyses statistiques qui tiendront compte à la fois de la nature des nuages formés (frontaux, stratiformes, cumuliformes, orographiques, etc...), de la nature des masses d'air (continentales, polluées, sahariennes, marines, etc...), des paramètres météorologiques et de la morphologie des nuages. Une classification et une analyse statistique pertinentes des événements nuageux amèneront à mieux quantifier l'importance de chacun des facteurs considérés sur la microphysique du nuage et son évolution climatologique.

Ce dispositif climatologique sera complété par des actions pilotes destinées à mieux comprendre et quantifier certains processus favorisant la condensation de la vapeur d'eau à la surface des aérosols, donc leurs propriétés CCN (taille, tension de surface, accommodation des gaz, composition chimique, degré de mélange, état de surface). Ceci permettra, à partir d'un spectre dimensionnel d'aérosol calculé sur la base des sources de particules et de ses transformations dans l'atmosphère, de déterminer un spectre d'activation des CCN dans différentes conditions environnementales.

Des études pilotes, comme celles effectuées lors des campagnes CIME ou PNCA viendront compléter le dispositif d'étude. Par exemple, nous avons montré que le rôle de la chimie des particules et de leur état de mélange (Sellegrì et al., 2002a) était fondamental pour comprendre le processus de nucléation. La faculté de certains composés chimiques à servir de noyau de condensation dépend de leur association chimique avec des composés solubles ou des gaz.

2.1.2 La caractérisation des noyaux glaçogènes

Dans l'atmosphère, les gouttes liquides peuvent exister même à des températures bien inférieures à 0°C, i.e. dans un état surfondu. En fait, un nombre significatif de particules de glace se forme seulement en dessous de -5°C, coexistant la plupart du temps avec des gouttes liquides. La congélation spontanée de toutes les gouttes liquides ne se produit qu'à des températures inférieures à -40°C. Dans la gamme de température entre -5 °C et -40°C, la présence de noyaux glaçogènes est nécessaire pour initier la formation d'un cristal de glace. **Cette étape de l'évolution microphysique d'un nuage est extrêmement sensible car elle influe non seulement sur la formation de la pluie, mais aussi sur le potentiel givrant des hydrométéores et des nuages.**

Les noyaux glaçogènes (IN) sont des particules d'aérosols, de nature différente des noyaux de condensation. Ces particules interviennent selon différents modes :

- le mode de dépôt de vapeur: l'eau est adsorbée directement de la phase vapeur sur la surface de l'IN où il se transforme en glace
- le mode de congélation: l'IN initie la phase glace à partir d'une goutte surfondue
- le mode de contact: l'IN initie la phase glace au moment du contact avec la goutte surfondue.

Le nombre d'IN dépend donc, a priori, simplement des propriétés chimiques de l'aérosol, ainsi que de la sursaturation en vapeur d'eau et de la température. Pourtant, il est extrêmement difficile de prévoir le nombre de noyaux glaçogènes dans une population de particules et d'estimer si **les émissions de composés chimiques par activités anthropiques contribuent ou non à augmenter leur concentration.**

Comme pour la formation des gouttes, les substrats susceptibles de jouer le rôle de noyaux glaçogènes sont nombreux et leur pouvoir glaçogène très dépendant de leur composition chimique et de leur nature. Plusieurs types de noyaux ont été étudiés : matière solide organique, inorganique, microorganismes, monocouches...

De plus, la nature de la surface du noyau glaçogène va être essentielle pour favoriser la formation de glace sur des sites préférentiels appelés sites de nucléation et est encore assez mal documentée actuellement (Vali, 1999).

Le travail de recherche dans le cadre de l'ORE-BEAM concerne donc **la mise en évidence de substrats organiques et biologiques susceptibles de servir de noyaux glaçogènes.**

2.2. Les processus de transfert et de transformation en phase hétérogène et ses implications sur la capacité oxydante de la troposphère

La capacité oxydante de l'atmosphère est déterminée par la quantité de radicaux, principalement les radicaux OH le jour et les radicaux NO₃ la nuit, qui vont oxyder les composés chimiques présents dans l'atmosphère. Les composés oxydés étant plus facilement incorporés dans les précipitations, les radicaux ont donc un rôle nettoyant pour les espèces atmosphériques et les polluants anthropiques en particulier. La détermination de la quantité de radicaux présents dans l'atmosphère implique la prise en compte des chaînes d'oxydation des composés organiques volatiles (COV) et particulièrement des COV oxygénés plus solubles, et de la chimie des composés inorganiques notamment les composés azotés (NO_y), les halogènes et les composés soufrés à la fois dans la phase gazeuse et dans la phase aqueuse. Elle nécessite également la prise en compte des processus d'échange entre les phases mais aussi la réactivité en phase hétérogène comme par exemple à la surface des cristaux de glace ou des particules d'aérosols secs. L'influence de la radiation solaire comme source d'énergie dans les mécanismes réactionnels est aussi prépondérante mais difficile à quantifier en raison de la transmission complexe des rayons lumineux dans les systèmes nuageux. Enfin, les mécanismes réactionnels de transformation des espèces chimiques en phase hétérogène semblent faire intervenir également des substances et des organismes biologiques.

Dans ce cadre, l'ORE-BEAM aura pour objectif de contribuer à la compréhension de l'évolution biologique, chimique et physique de l'eau atmosphérique sous l'action de mécanismes photochimiques, chimiques et biologiques. Il s'agira de comprendre et quantifier les processus de transformation, de caractériser leur efficacité dans les systèmes atmosphériques qu'ils soient liquides ou glacés.

2.2.1 La photochimie des milieux aqueux atmosphériques

L'atmosphère peut-être considérée comme un immense réacteur photochimique entourant notre planète, dans lequel l'excitation de certaines espèces chimiques par le rayonnement solaire constitue le processus d'activation de l'ensemble de la chimie atmosphérique. Cela est connu depuis longtemps puisque dès les années 1920, Chapman avait établi la formation photochimique de l'ozone dans la stratosphère à partir de la photodissociation du dioxygène. Avec le très gros effort de recherche qui a été consenti depuis trente ans pour comprendre le milieu atmosphérique, on sait maintenant que la chimie de l'atmosphère est un ensemble très complexe dans lequel les étapes photochimiques sont nombreuses et déterminantes. Cependant, l'étude des phénomènes photochimiques dans la troposphère a surtout été développée dans la phase gazeuse homogène. L'ensemble des travaux actuels fait état d'un manque considérable de données en matière de transfert entre phases et de réactivité des composés organiques solubles en phase liquide.

Les réactions photochimiques contribuent à la transformation des composés chimiques présents dans les milieux aquatiques naturels (Boule et al., 1998). Leur rôle est essentiel en chimie atmosphérique mais aussi dans la partie des eaux de surface, appelée zone photique, où les photons d'origine solaire sont absorbés.

L'objectif de nos recherches relatives aux réactions photochimiques en milieu aqueux naturel est d'identifier ces réactions et les espèces prédominantes qui interviennent. Il est aussi de recueillir des données permettant de modéliser l'ensemble des conséquences de ces réactions. Ces recherches doivent également contribuer à une meilleure prévision des effets des pollutions chroniques ou accidentelles. Elles peuvent aussi conduire à modifier les réglementations dans un sens ou dans l'autre, selon que les transformations photochimiques, éventuellement couplées à des transformations chimiques ou biologiques, augmentent ou diminuent les nuisances ou la toxicité.

Qu'il s'agisse des réactions provoquées par le rayonnement solaire dans la phase aqueuse atmosphérique ou à la surface des eaux continentales, les mêmes espèces chimiques interviennent. Ce sont essentiellement, d'une part les diverses espèces oxygénées et les radicaux hydroxyle, et d'autre part les radicaux organiques R[•], RO[•], RO₂[•]. Les mêmes concepts sont donc employés dans les diverses recherches de photochimie ayant trait à notre environnement.

En terme de photochimie, les composés chimiques peuvent être classés en deux grandes familles : soit ils absorbent la lumière solaire et peuvent donc subir une photolyse directe, soit ils n'absorbent pas ou très peu la lumière solaire et dans ce cas là ils peuvent subir une dégradation photoinduite par des espèces absorbantes présentes dans le milieu aquatique. Parmi ces espèces nous pouvons citer, la

matière organique et plus spécialement les substances humiques, les ions nitrates et nitrites et les métaux de transition. Une partie de notre travail concernera l'étude de la photodégradation, des composés organiques ou inorganiques de la phase aqueuse atmosphérique, induite par le fer et/ou les substances humiques. Cela rejoint l'activité que nous développons au LPMM depuis plusieurs années (voir publications et thèses du laboratoire de Photochimie) sur le devenir de composés chimiques dans la phase aqueuse lorsqu'ils subissent l'action couplée de la lumière solaire et du fer. Toutes nos études ont montré l'efficacité et l'importance des complexes aqueux de fer pour le photodégradation des composés chimiques du milieu aquatique. Dans la grande majorité des cas nous atteignons la minéralisation complète du polluant lorsqu'il subit l'action couplée du fer et de la lumière solaire.

Une grande partie de notre activité de recherche sera donc centrée sur le fer. En effet le fer est le quatrième élément le plus abondant de la terre et surtout le plus abondant des métaux de transition. On le retrouve dans tous les compartiments de l'environnement (Faust et al., 1990). De plus, les réactions de photooxydoréduction des différentes espèces de Fe(III) des compartiments aquatiques naturels sont suffisamment rapides pour perturber le cycle géochimique de nombreux autres éléments (carbone, soufre, phosphore, oxygène, azote, ...) et pour influencer de façon importante la composition de la phase aqueuse (Graedel et al., 1985, 1986 ; Weschler et al. 1986). Cependant, la réactivité du fer dans les milieux naturels dépend fortement de la forme sous laquelle il se trouve. La plus grande partie du fer présent dans les aérosols est combiné à l'oxygène sous forme d'oxydes ou d'oxyhydroxydes parmi lesquels on trouve le plus souvent α -Fe₂O₃, Fe₃O₄, α -FeOOH et γ -FeOOH. Néanmoins, quand une particule contenant du fer sert de noyau de condensation, le fer particulaire participera à une réaction de transfert d'électron à l'intérieur de la phase aqueuse, ce qui entraînera le passage du fer en phase aqueuse (Pehkonen et al. 1993). La concentration du fer en solution aqueuse augmente par l'intermédiaire de réactions de photo-oxydoréduction impliquant le Fe(III). La réactivité du fer en solution aqueuse sur les composés organiques ou inorganiques dépend de l'état d'oxydation et de la spéciation du métal. Différents auteurs (Weschler et al. 1986, Graedel et al. 1986) ont montré l'importance de la spéciation du fer en solution aqueuse pour les propriétés de catalyseur, d'oxydant ou de photo-oxydant du Fe(III). Il est clair que les complexes aqueux de Fe(III) présents dans les gouttes de nuages sont les sources majeures d'oxydants atmosphériques, comme \cdot OH (Faust et al. 1990, 1992, Benkelberg et al. 1990), SO_x \cdot (Faust 1984, Faust et al. 1989), HO₂ \cdot /O₂ \cdot (Zuo and Hoigné 1992) et H₂O₂ (Zuo and Hoigné 1992) qui vont jouer un rôle majeur pour la composition de l'atmosphère.

Notre but principal est de suivre l'impact de la chimie (photochimie) dans la phase aqueuse atmosphérique en suivant principalement l'évolution des composés organiques (photoformation et phototransformation), des espèces oxydantes formées et l'importance du fer, qui est un élément clé, pour la chimie atmosphérique. La finalité est de connaître les capacités oxydantes et photooxydantes des milieux aquatiques naturels (nuage) afin de définir un indicateur de pollution et/ou de self régénération.

2.2.2. La réactivité en phase hétérogène

Les modifications de la composition chimique atmosphérique dues à la chimie multiphasique mettent en jeu des processus complexes et difficiles à appréhender. Plusieurs raisons concourent à cet état de fait. Tout d'abord, dans les milieux condensés atmosphériques, il est délicat d'attribuer toute modification chimique à un processus spécifique. Plus précisément, le problème est de déterminer l'importance relative des processus suivants : solubilité d'un gaz, réactivité d'un gaz souvent accrue/réduite par la présence de la phase liquide/glace, faculté d'un gaz à se fixer sur des particules solides, de participer à des réactions d'hydrolyse, de biaiser les réactions photochimiques, contribution relative des polluants gazeux/particulaires à la chimie des nuages. La conjonction de l'altération des taux de photolyse par la présence d'aérosols ou de nuages (Madronich, 1987 ; 1998) et de la séparation d'espèces réactives entre l'air interstitiel et la phase condensée peut conduire à de nouveaux processus ou à de nouvelles espèces chimiques qui ne seraient pas apparues en situation de ciel clair (Jacob, 2000).

Puis les nuages subissent des évolutions rapides, comme des changements de phase (condensation/évaporation, fusion de la glace,...), ils sont le siège de processus microphysiques (tels que la collision/coalescence, le givrage,...) qui redistribuent et modifient la composition chimique de l'air interstitiel et de la phase condensée (Pruppacher et Klett, 1997 ; Warneck, 2000).

Enfin, pour appréhender ces nombreux processus physico-chimiques, on entrevoit la nécessité de procéder à des mises en œuvre expérimentales sophistiquées. En laboratoire, il s'agit de reproduire la

réalité atmosphérique où les échanges entre phases et les nombreuses réactions chimiques sont fort éloignés de leur état d'équilibre (prise en compte de cycles de condensation/évaporation successifs, écarts à la loi de Henry, dépendance à la taille variable des gouttes, à la géométrie des cristaux). Sur le terrain, l'objectif principal va être d'effectuer des mesures chimiques et microphysiques simultanées ou encore de chercher à séparer la fraction interstitielle de la fraction condensée de l'échantillon nuageux.

Plusieurs campagnes de mesures ont cherché à documenter la composition chimique des nuages et des brouillards (GCE, CHEMDROP, ACE-2) dans la phase gazeuse, aqueuse et particulaire afin d'améliorer notre compréhension de la chimie multiphase. Cependant, du fait de la complexité des mécanismes chimiques atmosphériques, les mesures des gaz atmosphériques en traces sont encore insuffisantes, elles nécessitent des techniques sophistiquées, à faible résolution et à haute fréquence d'échantillonnage. En particulier, la répartition des concentrations gazeuses en profils verticaux est encore difficile à obtenir malgré le développement de nouvelles instrumentations aéroportées ou de mesures de télédétection. Récemment, de nombreux efforts ont été faits dans les mesures de la composition chimique de l'air nuageux par le développement, notamment, d'appareils permettant d'échantillonner les gouttes en fonction de leur taille (Collett, Jr. et coll., 1993 ; 1999). Ces mesures ont démontré que la composition des gouttes varie de façon importante en fonction de leur taille. Pour la caractérisation chimique des milieux condensés, des solutions techniques telles que celles adoptées dans l'utilisation de la sonde à impaction virtuelle (Noone et coll., 1988a, Schwarzenböck et Heintzenberg, 2000) offrent actuellement des perspectives intéressantes pour établir au mieux la répartition des espèces chimiques gazeuses et particulaires entre le milieu interstitiel et le milieu nuageux.

Les études passées portant sur la chimie aqueuse se sont principalement focalisées sur les acides minéraux dans le cadre du problème des pluies ou brouillards acides (Jacob et coll., 1986a ; 1986b ; Kelly et coll., 1989 ; Xing et Chameides, 1991). Quelques études ont montré que les nuages peuvent être un puits d'ozone dans les régions polluées riches en NO_x et NMHCs (hydrocarbures non méthaniques) en réduisant sensiblement sa production photochimique (Jonson et Isaksen, 1993 ; Walcek et coll., 1997 ; Lelieveld et Crutzen, 1991 ; Acker et coll., 1995 ; Beyrich et coll., 1996) mais l'importance de cet effet est controversée et reste incertaine (Liang et Jacob, 1997). Les nuages jouent également un rôle important dans la production d'oxydants et d'acides (Faust et Allen, 1993 ; Arakaki et coll., 1995 ; Chebbi et Carlier, 1996 ; Faust et coll., 1997) qui va influencer sur la capacité oxydante de la troposphère.

Cette connaissance lacunaire est due notamment à l'existence de composés intermédiaires en phase hétérogène encore non identifiés (radicaux peroxy organiques issus de l'oxydation des COVs oxygénés), à la difficulté de considérer des processus météorologiques et chimiques d'échelles spatio-temporelles très différentes.

Dans le cadre de l'ORE, la répartition des espèces gazeuses et particulaires entre le milieu interstitiel et le milieu condensé sera documentée lors de différentes situations météorologiques et polluantes pour mieux caractériser la composition chimique des nuages et des précipitations.

2.2.3. Les mécanismes du transfert des espèces gazeuses dans les nuages mixtes (liquides et/ou glacés)

Entre 0°C et -10°C, les nuages sont principalement constitués de particules surfondues. La glace n'apparaît significativement qu'à des températures inférieures mettant en jeu des processus microphysiques plus nombreux (cf Figure 4). Ces derniers redistribuent les espèces chimiques entre les différentes catégories d'eau, de glace et peuvent conduire à un lessivage plus efficace que les nuages liquides.

De plus, la glace affecte la réactivité des espèces, soit en les piégeant au sein du cristal, soit en laissant aussi la possibilité aux réactions hétérogènes de se produire plutôt en surface, dans une couche de transition pseudo-liquide. Cet aspect reste encore peu exploré et nécessite l'examen détaillé des processus de croissance des différents types de cristaux. Quoi qu'il en soit, les processus d'échanges entre les différents milieux se font hors équilibre thermodynamique et dépendent très fortement de la taille des gouttes, de la géométrie des cristaux.

Ces caractéristiques fines de la microphysique du nuage vont se répercuter jusqu'à l'échelle du nuage et du système nuageux par le biais des modifications des paramètres optiques du nuage ou encore des capacités du nuage à précipiter ou non.

A la différence des particules d'aérosols, les gaz ne sont pas impliqués dans le processus de nucléation : leur incorporation ne peut se faire que directement dans le cristal pendant sa croissance par diffusion de vapeur d'eau ou au moment du givrage par transfert de gaz préalablement dissous dans l'eau (Voisin et al., 2000).

Dans un nuage mixte, la glace, plus stable que l'eau va croître aux dépens des gouttelettes d'eau. Celles-ci vont s'évaporer, remobilisant ainsi partiellement les gaz qu'elles contiennent, la vapeur formée va se condenser sur les cristaux (effet Bergeron) en même temps qu'une partie des gaz traces présents (co-condensation). La littérature suggère (Pruppacher et Klett, 1977) qu'il faut des conditions de températures très basses et de fortes sursaturations pour observer la formation homogène de petites gouttelettes d'eau qui givrent de suite sans participation des noyaux glaçogènes. De telles conditions ont déjà été reproduites lors de l'expérience CIME au sommet du puy de Dôme (Wobrock et al (2001), Mertes et al (2001), Schwarzenböck et al (2001), Laj et al (2001)) lors d'épisodes d'ensemencement de nuages naturels avec du propane ou du CO₂ et confirment l'existence de ce phénomène.

Dans le cadre de l'ORE, nous proposons d'étudier ces divers processus d'incorporation des gaz en phase glace, jusqu'à présent peu étudiés, après la caractérisation physique nécessaire de la glace et de l'eau du nuage échantillonné. Ainsi, sera déterminée l'importance relative du givrage, de la condensation de vapeur d'eau, et le rôle de l'effet Bergeron dans le processus d'incorporation des gaz à la glace et/ou à l'eau.

L'objectif de cette partie est de mieux appréhender le rôle des nuages mixtes sur la capacité oxydante de l'atmosphère aux moyennes latitudes en étudiant des espèces clés comme le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, l'acétone... Pour ces différentes espèces, des coefficients d'incorporation des gaz dans la glace seront évalués en fonction des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des nuages.

2.3 Structure et fonctionnement des communautés microbiennes dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations - Impact sur un milieu récepteur

La structure et le fonctionnement des communautés microbiennes dans les nuages ainsi que dans les précipitations (pluie et neige) n'ont été que très récemment étudiés et de façon ponctuelle. Il s'agit, en effet, d'un champ de recherche quasiment vierge. Il apparaît cependant clairement que des communautés formées de bactéries, champignons, levures et protozoaires existent dans ces milieux très particuliers qui sont caractérisés par de faibles températures, des concentrations en nutriments relativement peu élevées mais significatives et la présence de nombreux composés chimiques (Matthias-Maser et al. 1995, Matthias-Maser and Jaenicke 1995, Fuzzi et al. 1997, Angulo-Romero et al. 1999, Rogerson et Detwiler 1999, Matthias-Maser et al. 2000, Sattler et al. 2001).

Ces microorganismes ont tout d'abord été considérés comme de simples "particules inertes" issues des milieux terrestres ou aquatiques et transportées au niveau des nuages. On sait maintenant qu'ils peuvent jouer un rôle clé dans les phénomènes de nucléation de la glace (Szyrmer and Zawadzki 1997). Certaines bactéries phytopathogènes d'origine terrestre ont été retrouvées dans les nuages, ces organismes possèdent un gène codant pour une protéine impliquée dans ce phénomène de nucléation de la glace. Le dommage des plantes induit par le gel pourrait représenter un avantage pour ces bactéries pour augmenter la quantité de nutriment disponible (Szyrmer and Zawadzki 1997).

Très récemment, il a été clairement montré que des microorganismes sont capables de vivre et de se développer dans les nuages. En effet des microorganismes collectés dans des gouttelettes de nuage se développent à des températures égales ou inférieures à 0°C (Sattler et al. 2001). Par ailleurs, la présence de bactéries, de microalgues et de protozoaires dans les océans polaires à l'interface eau-glace (Sime-Ngando 1997 et 1999) ou dans la neige (Duval et al. 1999, Carpenter et al. 2000, Thomas and Dieckmann 2002) a été clairement mise en évidence. A la suite d'études spatiales, il a pu être montré par ailleurs que la croissance de microorganismes est possible en présence d'un faible apport de nutriments (Hirsch 1986).

Enfin, il a été montré très récemment que des spores bactériennes pouvaient être le siège d'activités métaboliques significatives (Francis et Tébo, 2002).

L'ensemble de ces travaux laisse à penser que le développement et l'activité métabolique des communautés de microorganismes sont effectifs au sein même des nuages, mais aussi dans les précipitations (pluie et neige). De plus, les caractéristiques chimiques et microbiologiques des précipitations sont susceptibles d'influer sur la qualité chimique des

eaux et sur le fonctionnement microbiologique des écosystèmes aquatiques récepteurs (Sattler et al. 2001).

En conséquence, trois volets complémentaires de recherche sont proposés dans le cadre du présent projet :

- > étude de la structure des communautés microbiennes dans l'eau collectée à partir de différents types de nuages et de précipitations ,
- > étude du potentiel biodégradatif de ces communautés vis à vis de composés organiques carbonés,
- > étude de l'impact de la variabilité des caractéristiques chimiques et microbiologiques sur le fonctionnement d'un écosystème aquatique récepteur témoin (Lac d'Aydat).

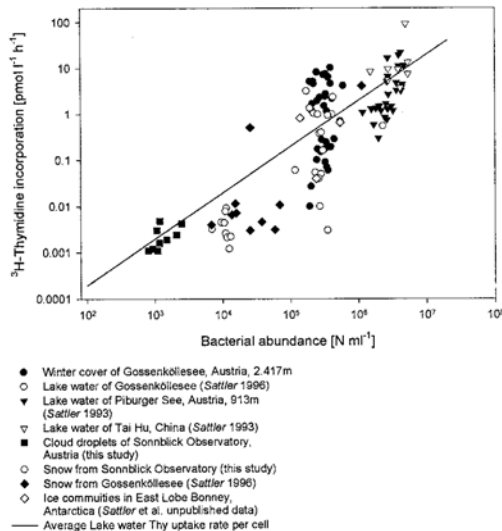


Figure 7: Abondance bactérienne comparée de l'eau nuageuse, de la neige fraîche, de l'eau de lac gelée en surface et de l'eau de lac à température in-situ.

microbiennes dans les nuages (Fuzzi et al., 1997). Par ailleurs, il a été observé que l'abondance bactérienne est plus élevée dans des nuages provenant de zones urbaines que dans les nuages de milieux ruraux (Matthias et Jaenicke, 1995).

Parmi les substances à fort pouvoir glaçogène, on trouve également des particules d'origine organique telles que des monocouches d'alcools à chaîne aliphatique longue qui recouvrant des gouttes d'eau vont geler à des températures proches de 0°C (Popovitz et al., 1994) mais aussi des bactéries comme les *Pseudomonas syringae* (Figure 7, Sattler et al., 2001).

Ainsi, une analyse qualitative et quantitative des communautés microbiennes sera conduite sur des échantillons provenant des nuages et des précipitations (pluie et neige).

2.3.2 Activités potentielles de biodégradation des communautés microbiennes

A la suite des travaux de Sattler et al. (2001), l'eau atmosphérique ne doit pas être seulement considérée comme un vecteur de microorganismes mais également comme un milieu où des activités microbiennes significatives se déroulent. En effet, les concentrations en éléments nutritifs minéraux (Fuzzi et al. 1997) et en carbone organique dissous ou COD (Sattler et al., 2001) permettent la croissance et la division des microorganismes. Ainsi, les valeurs de production bactérienne mesurée par incorporation de H³ thymidine ($2,34 \times 10^{-21}$ mol. thymidine h⁻¹. cell⁻¹) et les temps de génération des microorganismes (3 à 19 jours) sont du même ordre de grandeur que ceux des communautés lacustres (Falkowski, 1998 ; Sattler et al., 2001).

Plus précisément, les nuages et, par conséquent, les précipitations (pluie et neige), sont chargés de nombreuses espèces chimiques et, notamment, de composés organiques carbonés qui se forment dans les nuages. Il en est ainsi de nombreux composés oxygénés tels que le formaldéhyde, l'acétaldéhyde, le méthanol, l'acétone, le méthylhydroperoxyde, des dérivés d'hydrocarbures (C2-C8), des dérivés de nitrates tels que le PAN (peroxyacetylnitrate), des produits d'oxydation du diméthylsulfure (acide méthanesulfonique, diméthylsulfoxyde..) ou encore des dérivés de CFC (trifluoromethane, acide trifluoroacétique...) (Singh et al. 2001, Grosjean et al. 2001, Wu et al., 2001, Librando et al., 2001).

Ces composés peuvent être considérés comme des polluants atmosphériques mais également au niveau des milieux terrestre et océanique à la suite des précipitations. Ils représentent donc des risques potentiels pour la santé de l'homme (Vyskocil et al. 1998) et pour divers écosystèmes (Hanson et al., 2001).

Les microorganismes sont des acteurs majeurs des processus de dégradation de la matière organique et de xénobiotiques. Cependant, à notre connaissance, aucune recherche n'a été menée à ce jour sur leur potentialité dégradative dans les nuages ou dans les précipitations. Cette potentialité est pourtant tout à fait envisageable car la dégradabilité de ces composés a été rapportée dans la littérature pour des organismes venant d'autres environnements. Ainsi, certaines études montrent que des bactéries du sol ou marines sont capables de dégrader des dérivés du diméthylsulfure (Kelly and Murrell 1999, Gonzalez et al. 1999, De Marco et al. 2000, Eichhorn and Leisinger 2001...). Certains dérivés de CFC sont dégradés chez le rat et le foie humain via un cytochrome P450 (Urban et al. 1994, Dekant et al. 1995, Yin et al. 1995), leur dégradabilité par des microorganismes est donc fort probable si l'on considère l'ubiquité des cytochromes P450. Les composés oxygénés de type formaldéhyde, méthanol... sont de manière classique biodégradables par des microorganismes ainsi que les dérivés d'hydrocarbures.

Nous proposons donc de rechercher s'il existe des microorganismes capables de dégrader ce type de composés dans les nuages et les précipitations. Outre le rôle joué dans la chimie des nuages, ces microorganismes pourraient ensuite jouer un rôle majeur sur terre après dissémination par les précipitations.

Nous rechercherons également le potentiel métabolique de ces microorganismes vis à vis de la minéralisation de la matière organique. En effet, les concentrations en carbone organique dissous dans l'eau atmosphérique, de l'ordre de plusieurs mg.l^{-1} (Sattler et al., 2001) sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées, par exemple, dans les écosystèmes lacustres et sont donc susceptibles de soutenir une activité de dégradation significative.

Dans le cadre de ce projet, nous étudierons les principales activités hydrolytiques (glycolytiques et protéolytiques) des communautés bactériennes présentes dans l'eau atmosphérique et dans les précipitations.

2.3.3 Impact des caractéristiques chimiques et microbiologiques des précipitations sur le fonctionnement d'un écosystème aquatique récepteur (Lac d'Aydat)

Les caractéristiques chimiques et microbiologiques des précipitations ont-elles un impact significatif sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques récepteurs ?

La variabilité de ces caractéristiques en rapport avec les changements globaux peut-elle avoir un effet à long terme sur la qualité chimique des eaux et la dynamique microbienne des milieux récepteurs ?

Les rares travaux réalisés à ce jour dans ce domaine montrent que les bactéries dans l'eau atmosphérique croissent, se divisent et produisent une très grande variété de métabolites. Le facteur limitant le développement microbien dans ce milieu ne serait pas lié aux faibles températures, ni aux faibles concentrations en nutriments, mais à la brièveté du temps de résidence dans l'atmosphère (Sattler et al. 2001). Par ailleurs, il est admis depuis longtemps que le transport par l'atmosphère est un processus important de dispersion et de colonisation des microorganismes aquatiques et terrestres (Schnell et Vali, 1972).

Ainsi, il est important de savoir dans quelle mesure les communautés microbiennes de l'eau atmosphérique sont susceptibles, après déposition, de modifier la composition taxonomique des peuplements des milieux récepteurs, leurs activités métaboliques et les flux de carbone et d'énergie dans les réseaux trophiques. A ce sujet, les travaux d'Alfreider et al. (1996), conduits à l'aide de sondes moléculaires, ont montré que la composition taxonomique des bactéries présentes dans la neige à la surface d'un lac pris en glace est sensiblement différente de celle des eaux lacustres sous-jacentes.

Il faut préciser ici que ce projet de recherche constitue un prolongement et un complément original des travaux conduits dans le cadre d'une **ACI d'Ecologie quantitative du Ministère de la Recherche** sur la "*Signification fonctionnelle de la biodiversité dans les écosystèmes aquatiques*" et dont l'un des laboratoires co-requérants de la présente demande (UMR CNRS 6023) a la responsabilité. **En effet, à l'heure actuelle, nous n'avons aucune information sur le rôle des microorganismes présents dans les précipitations sur la dynamique de la biodiversité microbienne des milieux**

aquatiques récepteurs.

Pour apporter des éléments de réponse aux questions énoncées ci-dessus, nous proposons d'analyser, en parallèle et sur une longue durée (10 à 20 ans), les caractéristiques chimiques et microbiologiques, d'une part, dans les précipitations (pluies et neige) et, d'autre part, dans les eaux superficielles d'un milieu récepteur stagnant, l'épilimnion du lac d'Aydat.

Le lac d'Aydat est un lac dimictique, eutrophe et d'une profondeur maximale de 15,50 m. Les surfaces du lac et de son bassin versant sont respectivement de $60,3 \times 10^4 \text{ m}^2$ et $30 \times 10^6 \text{ m}^2$. Il a été retenu pour ce projet de recherche car il a fait l'objet depuis près de 30 ans de programmes scientifiques qui visaient à établir le fonctionnement de ce système lacustre soumis au phénomène d'eutrophisation.

2.4 Les développements de nouveaux capteurs

Pour les thématiques scientifiques présentées précédemment, les laboratoires participants disposent de l'instrumentation adéquate en termes de prélèvements in-situ dans les nuages, les précipitations et les eaux lacustres et en termes de caractérisation physique.

Cependant, l'intérêt du consortium interdisciplinaire réuni dans le cadre de l'ORE-BEAM offre l'opportunité unique de développer d'une part des systèmes de prélèvements d'eau nuageuse, d'eau précipitante (pluie, neige) entièrement automatisés, d'autre part des instruments miniaturisés pour leur emport sur avion.

Au LaMP, de nombreux moyens techniques visant à la caractérisation des nuages sont disponibles: des sondes microphysiques documentant la granulométrie des particules nuageuses et des aérosols et la géométrie des cristaux, des néphélomètres pour les propriétés optiques des gouttes, des cristaux et des particules d'aérosols et une sonde à impaction virtuelle séparant l'air interstitiel entre les gouttes et les cristaux et de la phase condensée, la station d'observation du puy de Dôme, ses mesures continues (météorologiques, physicochimiques) et sa soufflerie de recherche. Les réalisations techniques récentes sont détaillées ci-dessous :

Le Néphélomètre Polaire aéroporté destiné à la détermination in-situ de l'indicatrice de diffusion des hydrométéores (gouttelettes et cristaux de glace) et à la mesure du spectre dimensionnel des particules et des paramètres microphysiques subséquents. Développé sous l'égide de la DGA et testée dans la soufflerie du puy de Dôme, la sonde est opérationnelle. Elle est actuellement utilisée à la station du Pôle Sud en collaboration avec les chercheurs de NCAR. Une duplication de la sonde est envisagée par la division technique de l'INSU.

Le Néphélomètre Polaire appliqué aux aérosols a pour but de mesurer la section efficace volumique de diffusion des aérosols fins ($d < 5 \mu\text{m}$) afin d'interpréter les réflectances directionnelles mesurées par les imageurs spatiaux (par exemple Polder sur ADEOS). Ce type d'appareil est parfaitement transportable sur le terrain et peut être placé à l'intérieur d'un avion en le reliant à une prise d'air extérieur. La phase des essais avec le prototype est actuellement terminée. La construction de la sonde dans sa version définitive vient de s'achever.

La Sonde à impaction virtuelle (CVI), développée dans le cadre du PNCA, permet la séparation inertielle des hydrométéores et la collection de gouttelettes d'eau (ou de cristaux de glace) de diamètre supérieur à un diamètre aérodynamique prédéfini. La sonde a été testée à la station du puy de Dôme durant l'hiver 2000 et utilisée à des fins de recherche durant l'hiver 2001. Des publications sont en cours relatives à ces travaux.

Les radars UHF (Voldorad) et Stratosphère-Troposphère (RadarST). L'équipe a développé un radar UHF à une fréquence de 1238 Mhz. Les caractéristiques techniques de ce radar lui permettent de réaliser des mesures atmosphériques à partir de 300 m et jusqu'à une altitude de l'ordre de 1.5 km, en fonction des conditions météorologiques. Ce radar complète le radar ST profileur de vent, en fonctionnement à la station de Opme dans le cadre du programme ESTIME et des expériences MAP et ESCOMPTE.

L'analyseur H₂O. En collaboration avec le Laboratoire de Spectroscopie Physique de l'université Joseph Fourier (LSP-Grenoble) le LaMP a adapté une méthode d'analyse spectroscopique pour la mesure de H₂O dans la phase vapeur. L'augmentation artificielle du chemin optique d'absorption et une extraction avantageuse du coefficient d'absorption sont les points clés de la technique développée depuis 5 ans au LSP. La spectroscopie d'absorption par mesure du temps de déclin d'une cavité optique de très haute finesse ou CRDS (pour Cavity Ring Down Spectroscopy) utilise le piégeage de photons résonnant avec la cavité pour augmenter considérablement la longueur d'interaction. Typiquement, des distances équivalentes d'absorption de plusieurs kilomètres sont obtenues pour des dimensions de cavité de l'ordre du mètre. L'avantage inhérent à cette technique, outre l'augmentation spectaculaire du chemin optique, est qu'elle s'affranchit totalement des fluctuations de la source laser, facteur limitant la plupart des méthodes spectroscopiques.

L'analyseur Différentiel de Mobilité Volatilité Tandem (VTDMA). Cette sonde est en cours de construction au LaMP (projet ACI-Jeune chercheur). Elle permet la mesure de la granulométrie et de la volatilité des particules entre 10 et 800 nm. Elle se base sur l'utilisation d'analyseurs différentiels de mobilité (DMA). Le principe est de sélectionner des particules de même taille à l'aide d'un premier DMA, de les vaporiser à des températures pouvant atteindre 900°C, et de mesurer ensuite les variations en concentration et en taille qu'elles ont subi. Sa mise en service aura lieu au premier semestre 2002.

Ces développements instrumentaux sont amenés à se poursuivre et à se diversifier dans le cadre de l'ORE-BEAM. D'une part, les études de processus demanderont la mise en place de capteurs de plus en plus performants aptes à être utilisés sur des plates-formes spécifiques et permettant d'être utilisés pour des études pluri-disciplinaires. Les choix des débits de fonctionnement (haut et bas volumes), des matériaux utilisés (matériaux plastiques ou alliages métalliques) et des principes

de collecte (inertie, captation, impaction) seront primordiaux et devront être envisagés en intégrant tous les acteurs du projet. Une grande partie des capteurs seront réalisés avec les moyens techniques de l'OPGC sauf peut-être pour certaines pièces mécaniques ou électroniques pour lesquelles une sous-traitance extérieure sera nécessaire.

Parmi les projets envisagés à court terme dans le cadre de l'ORE figurent :

- Le CVI aéroporté qui pourrait être développé dans le cadre de la ré-instrumentation des avions français de recherches atmosphériques.
- Un échantillonneur de gouttes utilisable pour les mesures biologiques (stérilisable)
- Un échantillonneur de gouttes utilisable en continu (la possibilité d'échantillonneur multi-étages sera envisagée). La construction de cet échantillonneur se fera en collaboration avec la société ENVISCOPE.
- Un sonde pour la mesure du caractère hygroscopique des particules (HTDMA) ou chambre CCN.
- Un échantillonneur de goutte pour plate-formes aéroportées (avions, ballons) La construction de cet échantillonneur se fera en collaboration avec la société ENVISCOPE.
- D'autres capteurs seront envisagés au fur et à mesure de l'avancement du programme scientifique et l'évolution des problématiques.

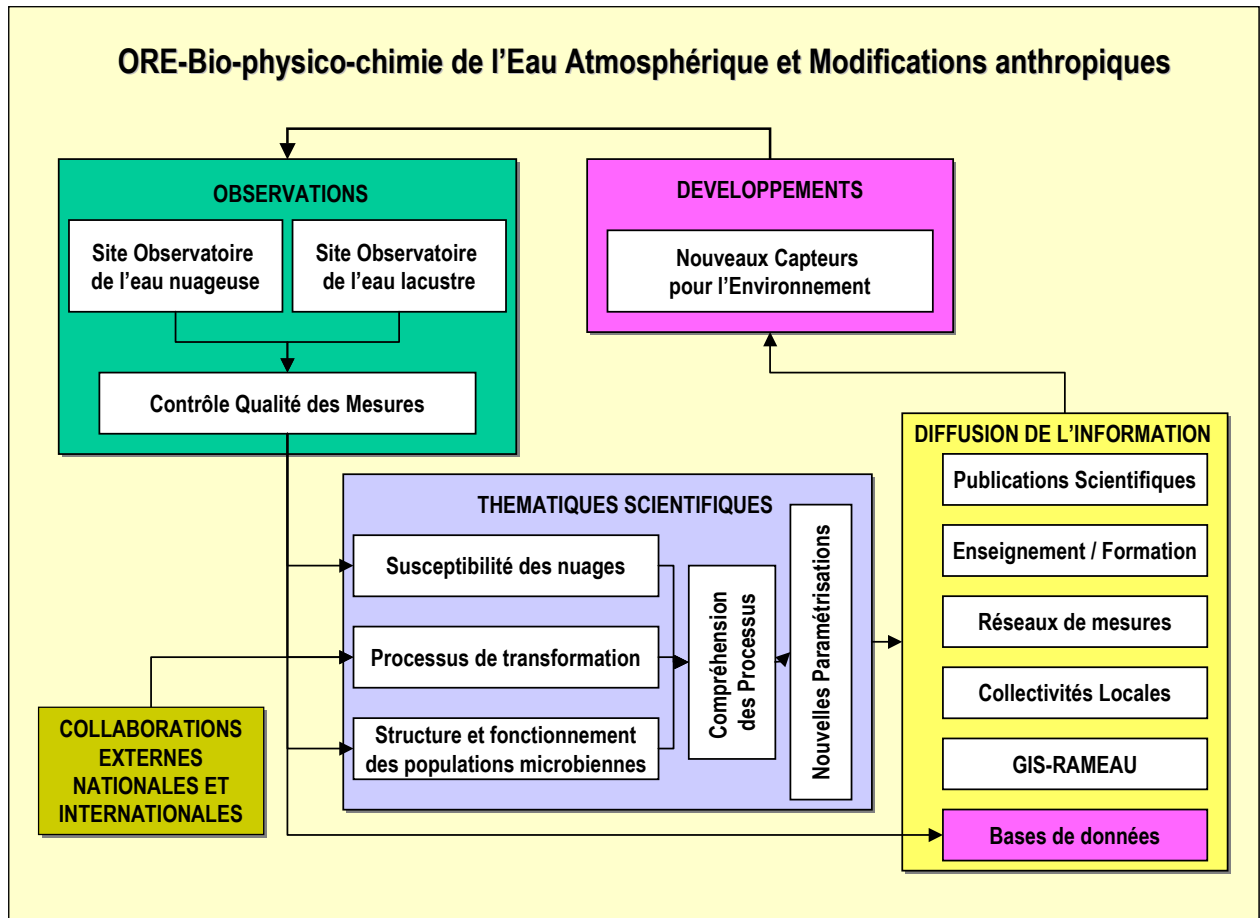
D'autre part, la vocation de l'ORE à devenir un organisme de référence pour les études sur l'eau atmosphérique nous amènera naturellement à élargir le nombre d'utilisateurs de la station du puy de Dôme. Les partenaires impliqués dans les travaux au puy de Dôme ont pu grandement bénéficier des développements effectués au LaMP sur les prises d'entrée d'air qualifiées à la fois pour des mesures continues ou dans le cadre de campagnes coordonnées (notamment, de l'échantillonneur WAI, prise d'entrée d'air totale, qui permet, en continu, la collecte puis l'évaporation des gouttelettes de nuage et l'échantillonnage intégré des aérosols résiduels). A l'heure actuelle, 12 instruments (voir Tableau 2) sont connectés en aval du WAI, permettant donc une mesure sans artefact dus à la présence de nuages. Le développement de capteurs « communautaires » sera une priorité dans le cadre de l'ORE. En particulier, nous procéderons à :

- Une amplification du capteur aérosol WAI pour permettre la connexion d'instrumentation supplémentaire
- La construction d'un capteur interstitiel gaz/particules communautaire
- La construction d'un échantillonneur gaz WAI communautaire.

Les utilisateurs de la station pourront en fonction des nécessités de leur recherche se connecter de manière rapide à l'une de ces prises d'entrées avec l'assurance d'une efficacité d'échantillonnage validée.

Une attention particulière sera donnée à la valorisation des nouveaux capteurs qui permettra de faire connaître l'état du développement des prototypes, leurs performances, leur champ d'application et leur intérêt commercial potentiel. Ceci permettra de déterminer les attentes des utilisateurs potentiels (industrie, les centres de recherche ou les collectivités locales) pour les intégrer dans l'élaboration du prototype. Ceci permettra d'apporter, dès la phase de réalisation, les éléments marketing susceptibles de convaincre un industriel de s'investir dans la fabrication du nouvel appareillage.

L'ORGANISATION DE L'ORE-BEAM



REFERENCES

- Acker, K, W. Wieprecht, D. Möller, G. Mauersberger and S. Naumann: Evidence of ozone destruction in clouds, *Naturwiss.* , 82, 86-89, 1995.
- Alfreider, A., J. Pernhaler, R. Amann, B. Sattler, F.O. Glöckner, A. Wille, R. Psenner, Community Analysis of the bacterial assemblages in the winter cover, *Appl. Environ. Microbiol.*, 62, 2138-2144, 1996.
- Andracchio, A. La componente organica macromolecolare nell'aerosol atmosferico : isolamento, caratterizzazione dimensionale e interazione con la componente inorganica. Thèse de doctorat, università degli studi di Bologna, discipline sciences chimiques, Mars 2002.
- Angulo-Romero J., Mediavilla -Molina A., Dominguez-Vilches E. : *Conidia of Alternaria* in the atmosphere of the city of Cordoba , Spain in relation to meteorological parameters. *Int. J. Biometeorol.* 43, 45-49, 1999.
- Arakaki, T., C. Anastasio, P.G. Shu and B.C. Faust: Aqueous-phase photoproduction of hydrogen peroxide in authentic cloud waters: wavelength dependence, and the effects of filtration and freeze-thaw cycles, *Atmos. Environ.* , 29-14, 1697-1703, 1995.
- Atkinson R, Baulch DL, Cox RA, Hampson RF, Kerr JA, Rossi MJ, Troe J, Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement VI - IUPAC subcommittee on gas kinetic data evaluation for atmospheric chemistry, *Journal Of Physical and Chemical reference Data*, Vol.26, No.6, pp.1329-1499, 1997a.
- Atkinson R, Baulch DL, Cox RA, Hampson RF, Kerr JA, Rossi MJ, Troe J, Evaluated kinetic, photochemical and heterogeneous data for atmospheric chemistry:

- Supplement V - IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry, *Journal Of Physical and Chemical reference Data*, Vol.26, No.3, pp.521-1011, 1997b.
- Atkinson R, Baulch DL, Cox RA, Hampson RF, Kerr JA, Rossi MJ, Troe J, Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement VII, Organic species - IUPAC subcommittee on gas kinetic data evaluation for atmospheric chemistry, *Journal Of Physical and Chemical reference Data*, Vol.28, No. 2, pp.191-393, 1999.
- Atkinson R, Baulch DL, Cox RA, Hampson RF, Kerr JA, Rossi MJ, Troe J, Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Supplement VIII, Halogen species - IUPAC subcommittee on gas kinetic data evaluation for atmospheric chemistry, *Journal Of Physical and Chemical reference Data*, Vol.29, No. 2, pp.167-266, 2000.
- Benkelberg H.J., Deister U., Warneck P.: OH quantum yield for the photodecomposition of Fe(III) hydroxo complexes in aqueous solution and the reaction with hydroxymethanesulfonate. *Physico-chemical behavior of atmospheric pollutants*, Eds. Kluwer, Dordrecht, 263, 1990.
- Beyrich F., K. Acker, D. Kalass, O. Klemm, D. Möller, E. Schaller, J. Werhahn and U. Weisensee: Boundary layer structure and photochemical pollution in the Harz mountains - an observational study, *Atmos. Environ.*, 30-8, 1271-1281, 1996.
- Boule P. (1998) : *Environmental Photo-chemistry*. Springer-Verlag, Berlin.
- Carpenter E.J. , Lin S. , Capone D.G. : Bacterial activity in South Pole snow. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 4514-4517, 2000.
- Chebbi A. and P. Carlier: Carboxylic acids in the troposphere, occurrence, sources and sinks: A review, *Atmos. Environ.*, 30, 4233-4249, 1996.
- Collett Jr, J.L., B. Oberholzer and J. Staehelin: Cloud chemistry at MT Rigi, Switzerland: Dependence on drop size and relationship to precipitation chemistry, *Atmos. Environ.*, 27A-1, 33-42, 1993.
- Collett Jr. J.L., K.J. Hoag, D.E. Sherman, A. Bator and L. Willard Richards: Spatial and temporal variations in San Joaquin Valley fog chemistry, *Atmos. Environ.*, 33-1, 129-140, 1999.
- De Marco P., Murrell J.C., Bordalo A.A. and Moradas-Ferreira P. : Isolation and characterization of two new methanesulfonic acid-degrading bacterial isolates from Portuguese soil sample. *Arch. Microbiol.* 173, 146-153, 2000.
- Dekant W., Assmann M. and Urban G. : The role of cytochrome P450 2E1 in the species-dependent biotransformation of 1,2-dichloro-1,1,2-trifluoroethane in rats and mice. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 135, 200-207, 1995.
- Dupuy, R., P. Laj, W. Wobrock, V. Vocourt, J.M. Pichon, Partitionning of aerosol particles in cloud at the puy de Dôme station (France) : model versus measurements, proceedings of the European Geophysical Society XXV General Assembly, Nice, France, 25 - 29 April 2000.
- Duval B., Duval E. and Hoham R.W. : Snow algae of the Sierra Nevada, Spain, and High Atlas mountains of Morocco. *Int. Microbiol.* 2, 39-42, 1999.
- Eichhorn E. and Leisinger T. : Escherichia coli utilizes methanesulfonate and L-cysteate as sole sulfur sources for growth. *FEMS Microbiol. Lett.* 205, 271-275, 2001.
- Falkowski, P.G., R.T. Barber, V. Smetacek, Biogeochemical controls and feedbacks on Ocean primary production, *Science*, 281, 200-206, 1998.
- Faust B.C.: Photo-induced reductive dissolution of hematite (α -Fe₂O₃) by S(IV) oxyanions. PhD dissertation, California Institut of Technology, Pasadena, 1984.
- Faust B.C., Hoffman M.R., Bahnemann D.W.: Photocatalytic oxidation of sulfur dioxide in aqueous suspensions of α -Fe₂O₃. *J. Phys. Chem.* 93, 6371, 1989.
- Faust B.C., Hoigné J. (1990): Photolysis of Fe(III)-hydroxy complexes as sources of OH radicals in clouds, fog and rain. *J. Atmos. Environ.*, 24A, 79-89.
- Faust B.C. and J.M. Allen: Aqueous-phase photochemical formation of hydroxyl radical in authentic cloud-waters and fog waters, *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1221-1224, 1993.
- Faust B.C., K. Powell, C.J. Rao and C. Anastasio: Aqueous-phase photolysis of biacetyl (and a-dicarbonyl compound): a sink for biacetyl and a source of acetic acid, peroxyacetic acid, hydrogen peroxide and the highly oxidizing acetylperoxyl radical in aqueous aerosol, fogs and clouds, *Atmos. Environ.*, 31, 497-510, 1997.
- Flossmann, A. : Cloud Ice Mountain Experiment (CIME). Final report of CEE contract ENV4-CT95-0012, 112 pp, 1999 .

- Francis C.A. and B.M. Tébo, : Enzymatic manganese (II) oxidation by metabolically dormant spores of diverser Bacillus species, *Appl. Environ. Microb.*, 68, 874-880, 2002
- Fuzzi S., Mandrioli P. and Perfetto A. : Fog droplets- an atmospheric source of secondary biological aerosol particles. *Atmos. Environ.* 31, 287-290, 1997.
- Gauchard P.A. Spéciation du mercure dans la phase liquide des nuages. DEA CPCA, 2002, en cours
- Gayet J.F., Auriol, F., Oshchepkov, S., Schröder, F., Duroure C., Febvre, G., Fournol, J.F., Crépel, O., Personne, P., Daugeron, D :In situ measurements of the scattering phase function of stratocumulus, contrails, and cirrus, *Geophys. Res. Lett.* Vol. 25 , No. 7 , p. 971-974, 1998.
- Gérémy, G., W. Wobrock, and A.I. Flossmann: A modelling study on the activation of small aitken-mode aerosol particles during CIME 97. *Tellus*, 52B, 959-979, 2000.
- Gonzalez J.M., Kiene R.P. and Moran M.A. : Transformation of sulfur compounds by an abundant lineage of marine bacteria in the alpha-subclass Proteobacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 3810-3819, 1999.
- Graedel T.E., Weschler C.J., Mandich M.L.: Influence of transition metal complexes on atmospheric droplet acidity. *Nature* 317, 240-242, 1985.
- Graedel T.E., Mandich M.L., Weschler C.J.: Kinetic studies os atmospheric droplet chemistry 2. Homogeneous transition metal chemistry in raindrops. *J. Geophys. Res.* 91 (D4), 5205-5221, 1986.
- Grosjean E., grosjean D. and woodhouse L.F. : Peroxyacetyl nitrate and peroxypropionyl nitrate during SCOS 97-NARSTO. *Environ. Sci. Technol.* 35, 4007-4014, 2001.
- Hanson M.L., Sibley P.K., Mabury S.A., Muir D.C. and Solomon K.R. : Chlorodifluoroacetic acid fate and toxicity to the macrophytes *Lemna gibba*, *Myriophyllum spicatum*, and *Myriophyllum sibiricum* in aquatic microcosms. *Environ. Toxicol. Chem.* 20, 2758-67, 2001.
- Hirsch P. : Microbial life at extremely low nutrient levels. *Adv. Space Res.* 6, 287-298, 1986.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001 : A scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Houghton et al., Eds, Cambridge Press University, Cambridge, NY, USA, 881pp.
- Jacob D.J., J.W. Munger, J.M. Waldman and M.R. Hoffmann: The H₂SO₄-HNO₃-NH₃ system at high humidities and in fogs 1. Spatial and temporal patterns in the San Joaquin Valley of California, *J. Geophys. Res.*, 91, 1073-1088, 1986a.
- Jacob, D.J., J.M. Waldman, J.W. Munger and M.R. Hoffmann: The H₂SO₄-HNO₃-NH₃ system at high humidities and in fogs 2. Comparison of field data with thermodynamic calculations, *J. Geophys. Res.*, 91-D1, 1089-1096, 1986b.
- Jacob, D.J.: Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone, *Atmos. Environ.*, 34-12-14, 2131-2159, 2000.
- Jonson J.E. and I.S.A. Isaksen: Tropospheric ozone chemistry. The impact of cloud chemistry, *J. Atmos. Chem.*, 16, 99-122, 1993.
- Kelly, T.J., S.E. Schwartz and P.H. Daum : Detectability of acid producing reactions in natural clouds, *Atmos. Environ.*, 23-3, 569-583, 1989
- Kelly D.P. and Murell J.C. : Microbial metabolism of methanesulfonic acid. *Arch. Microbiol.* 172, 341-348, 1999.
- Lawrence, M. G., and P.J. Crutzen: The impact of cloud particle gravitational settling on soluble gas distributions, *Tellus*, 50B, 263-289, 1998
- Laj P., A.I. Flossmann, W. Wobrock, S. Fuzzi, G. Orsi, L. Ricci, St. Mertes, A. Schwarzenböck, J. Heintzenberg, H. Ten Brink : Behaviour of H₂O₂, NH₃ and black carbon in mixed phase clouds during CIME, *Atmos. Res.*, 58, 315-336, 2002.
- Leaith, W. R., S.M., Li, P.S.K. Liu, C.M. Banic, A.M. Macdonald, G.A. Isaac, M.D. Couture, and J.W. Strapp: Relationships among CCN, aerosol size distribution and ion chemistry from airborne measurements over the Bay of Fundy in August-September, 1995. In : *Nucleation and Atmospheric aerosols.*, M. Kulmala and P. Wagner (eds). Elsevier Science Inc., pp. 840-843, 1996.
- Lelieveld , J. and P.J. Crutzen: The role of clouds in tropospheric photochemistry, *J. Atmos. Chem.*, 12, 229-227, 1991.
- Liang and D.J. Jacob: Effect of aqueous phase cloud chemistry on tropospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 102-D5, 5993-6002, 1997.

- Librando V., Triagali G., Hjorth J. and Jensen N.: Formation and reaction pathways of atmospheric oxidation of dimethylsulfide. *Ann. Chim.* 91, 415-424, 2001.
- Madronich S.: Photodissociation in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 92, 9740-9752, 1987.
- Madronich, S. and S. Flocke: The role of solar radiation in atmospheric chemistry, in: *The Handbook of Environmental Photochemistry, Vol. 2: Reactions and Processes. Part L*, O. Hutzinger Ed., Springer-Verlag, New York, pp. 1-26, 1998.
- Marinoni, A. P. Laj, G. Mailhot, E. Bolzacchini, V. Maggi, C₁₋₃ organic acids and Fe(II)/Fe(III) in the atmospheric liquid phase to the puy de Dome station. *Proceedings of the conference on Oxygenated Organics in the Atmosphere – Sources, Sinks and Atmospheric Impact, Como, Villa Olmo, Oct., 5 - 7, 2001*
- Matthias-Maser S. and Jaenicke R. : The size distribution of primary biological aerosol particles with radii > 0.2 μm in an urban/rural influenced region. *Atmos. Res.* 39, 279-286, 1995.
- Matthias-Maser S., Peters K. and Jaenicke R. Seasonal variation of primary biological aerosol particles. *J. Aerosol Sci.* 26, S545-S546, 1995.
- Matthias-Maser, S., B. Bogsand R. Jaenicke : The size distribution of primary biological aerosol particles in cloud water on the mountain Kleiner Feldberg, Taunus (FRG), *Atm. Res.*, 54, 1-13, 2000.
- Mertes, St., A. Schwarzenböck, P. Laj, W. Wobrock, J.M. Pichon, G. Orsi, J., Heintzenberg : Changes of cloud microphysical properties during the transition from supercooled to mixed-phase conditions during CIME; *Atmos. Res.*, 58, 267-294, 2001.
- Noone K.J., R.J. Charlson, D.S. Covert, J.A. Ogren and J. Heintzenberg: Design and calibration of a counterflow virtual impactor for sampling of atmospheric fog and cloud droplets, *Aer. Sci. Technol.*, 8, 235-244, 1988.
- Pehkonen S.O., Siefert R., Erel Y., Webb S., M.R. Hoffmann: Photoreduction of iron oxyhydroxides in the presence of important atmospheric organic compounds. *Environ. Sci. Technol.* 27, 2056-2062, 1993.
- Petters, M. J. Snider, R. Dupuy, K. Sellegri, P. Laj, Cloud Condensation Nuclei Closure Experiment at the puy de Dome, France, *proceedings of the AGU spring meeting, Boston, 2001*
- Popovitz-Biro R., J.L. Wang, J. Majewski, E. Shavit, L. Leiserowitz and M. Lahav: Induced freezing of supercooled water into ice by self-assembled crystalline monolayers of amphiphilic alcohols at the air-water interface, *J. Amer. Chem. Soc.*, 116, 1179-1191, 1994.
- Pruppacher H.R. and J.D. Klett: *Microphysics of Clouds and Precipitation*, 2nd Ed., 954 pp, Reidel, Dordrecht, 1997.
- Rogerson A. and A. Detwiler : Abundance of airborne heterotrophic protists in ground level air of South Dakota, *Atmos. Res.*, 51, 35-44, 1999.
- Romanini D., Fournol, J.-F., Morville., J., Laj P. CRDS Measurements of H₂O vapour in clouds. *En preparation*, 2002.
- Sattler B., Puxbaum H. and Psenner R. : Bacterial growth in supercooled cloud droplets. *Geophys. Res. Lett.* 28, 239-242, 2001.
- Schnell, R.C. and Vali G.: Atmospheric ice nuclei from decomposing vegetation, *Nature*, 236, 163-165, 1972.
- Schwarzenböck A., and Heintzenberg, J. : Cut size minimization and cloud element break-up in a ground-based CVI , *J. Aerosol Sci.* Vol. 31 , No. 4 , p. 477-489 (Elsevier), 2000.
- Schwarzenböck A., St. Mertes, J. Heintzenberg, W. Wobrock, P. Laj: Impact of the Bergeron Findeisen process on the release of aerosol particles during the evolution of cloud ice; *Atmos. Res.*, 58, 295-314, 2001.
- Sellegri K., P. Laj, F. Peron, R. Dupuy, M. Legrand, S. Preunkert, J-P. Putaud, H. Cachier, G. Ghermandi, Mass balance of winter time free tropospheric aerosol at puy de Dôme (France) *en préparation*, 2002a.
- Sellegri K., P. Laj, R. Dupuy, M. Legrand, S. Preunkert, J-P. Putaud, Size-dependent scavenging efficiencies of multi-component atmospheric aerosols in clouds, *en préparation*, 2002b.
- Sime-Ngando, T., Demers, S. and Juniper, S. K.: Protozoan bacterivory in the ice and the water column of a cold temperate lagoon. *Microb. Ecol.*, 37: 95-106, 1999.
- Sime-Ngando, T., Juniper, K. and Demers, S. : Ice-brine and planktonic microheterotrophs from Saroma-Ko Lagoon, Hokkaido (Japan) : Quantitative importance and trophodynamics. *Dans :*

- Therriault JC, Devine L. and FUKUCHI M (Eds.) - The Canadian-Japan SARES Project on first-year sea ice. *J. Mar. Syst.*, 11: 149-161, 1997.
- Singh H., Chen Y., Staudt A., Jacob D., Blake D., Helkes B. And Snow J. : Evidence from the pacific troposphere for large global sources of oxygenated organic compounds. *Nature* 410, 1078-1081, 2001.
- Szyrmer W; and Zawadzki I. : Biogenic and anthropogenic sources of ice-forming nuclei: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 209-227, 1997.
- Thomas D.N. and Dieckmann : Antarctic sea ice –a habitat for extremophiles. *Science* 295, 641-644, 2002.
- Urban G., Speerschneider P. and Dekant W. : Metabolism of the chlorofluorocarbon substitute 1,1-dichloro-2,2,2-trifluoroethane by rat and human liver microsomes: the role of cytochrome P450 2E1. *Chem. Res. Toxicol.* 7, 170-176, 1994.
- Vali G.: Ice nucleation theory, A tutorial, NCAR/ASP 1999 SUMMER COLLOQUIUM, 1999.
- Vocourt, V., Fournol J-F., Cortes L., Jourdan O., Laj P., et Chaumerliac N. Calibration de la sonde à impaction virtuelle et résultats préliminaires. *Atelier Expérimentation et Instrumentation (INSU-METEO FRANCE)* Toulouse, 9-10 Décembre 1999.
- Voisin D., M. Legrand and N. Chaumerliac: Investigations of the scavenging of acidic gases (HCOOH, CH₃COOH, HNO₃, HCl, and SO₂) and ammonia in mixed liquid-solid water clouds at the puy de Dôme mountain (France), *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, No. D5, p. 6817-6836, 2000.
- Vyskocil A., Viau C. and Lamy S. : Peroxyacetyl nitrate : review of toxicity. *Hum. Exp. Toxicol.* 17, 212-220, 1998.
- Walcek C.J., H. Yuan and W.R. Stockwell: The influence of aqueous-phase chemical reactions on ozone formation in polluted and non-polluted clouds, *Atmos. Environ.*, 31, 1221-1237, 1997.
- Warneck, P.: *Chemistry of the Natural Atmosphere*, Second Edition, Dmowska R., J.R. Holton and H.T. Rossby Eds., International Geophysics Series, Vol. 71, Academic press, INC., 927 pp., 2000.
- Weschler C.J., Mandich M.L., Graedel T.E. : Speciation, photoreactivity, and reactions of transition metal ions in atmospheric droplets. *J. Geophys. Res.* 91 (D4), 5189-5204, 1986.
- Wilhelm, S. thèse de diploma, Université Heidelberg, 2002, en cours.
- Wobrock, W., A.I. Flossmann, M. Monier, J ;M. Pichon, L. Cortez, J.F. Fournol, A. Schwarzenböck, St. Mertes, J. Heintzenberg, P. Laj, G. Orsi, L. Ricci, S. Fuzzi, P. Jongejan, R. Otjes. H. TenBrink : The Cloud Ice Mountain Experiment CIME 1998 : Experiment overview and modelling of the microphysical processes during the seeding by isentropic gas expansion. *Atmos. Res.*, 58, 231-266, 2001.
- Wu L., Chen L., Li Y., Yang Y., Shen Y., Dong Z., Yaoshiyuki F. : Study on the abundance of CFCs varying with the latitude at the bottom of the troposphere in the southern hemisphere. *Environ. Sci. Technol.* 35, 2436-2440, 2001.
- Xing L., and W.L. Chameides: Model studies of the impact of chemical inhomogeneity on SO₂ oxidation in warm stratiform clouds , *J. Atmos. Chem*, 13, 109-129 1991.
- Yin H., Jones J.P. and Anders M.W. : Metabolism of 1-fluoro-1,1,2-trichloroethane, 1,2-dichloro-1,1-difluoroethane, and 1,1,1-trifluoro-2-chloroethane. *Chem. Res. Toxicol.* 8, 262-268, 1995.
- Zepp R.G., Faust B.C., Hoigné J. : Hydroxyl radical formation in aqueous reactions (pH 3-8) of iron(II) with hydrogen peroxide: the photo-Fenton reaction. *Environ. Sci. Technol.* 26, 1014, 1992.
- Zuo Y. and Hoigné J. : Formation of hydrogen peroxide and depletion of oxalic acid in atmospheric water by photolysis of iron(III)-oxalato complexes. *Environ. Sci. Technol.* 26, 1014, 1992.

LIEN AVEC DES PROBLEMATIQUES D'IMPACT ET DE RISQUE

L'ORE-BEAM, à l'amont des activités de surveillance opérationnelle, propose des études de processus afin de quantifier l'impact anthropique sur l'eau atmosphérique, ses conséquences sur la qualité chimique des eaux et le fonctionnement microbiologique des écosystèmes récepteurs.

A ce sujet, les partenaires de l'ORE-BEAM participent également au GIS-RAMEAU (Ressources et Aménagement des Eaux du Massif Central), qui résulte d'un projet porté par le BRGM (antennes régionales de Clermont-Ferrand et de Limoges), l'EM-SE (Ecole des Mines de Saint-Etienne), l'OIEAU (Office International de l'Eau à Limoges) et l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand. L'objectif de ce GIS est double :

- Apporter une contribution significative à la connaissance quantitative et qualitative des ressources en eau de surface et souterraines, au sein du cadre géographique, géologique, hydrologique que constitue le Massif central ;
- Recenser et mettre au point des outils destinés à aider la mise en place des politiques de développement durable du territoire, permettant la mise en valeur de ses potentialités, tout en préservant l'intégrité qualitative et quantitative de ses ressources en eau, et de celles des régions situées en aval.

Sur cette base, le GIS RAMEAU met en œuvre un projet scientifique visant à comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes depuis les couches profondes du sous-sol jusqu'aux eaux de surface afin de donner des réponses opérationnelles aux questions des gestionnaires des ressources en eau (services de l'état, collectivités territoriales, entreprises, etc...) et d'anticiper les aménagements à entreprendre. En conséquence, les objectifs scientifiques de l'ORE-BEAM se situent en amont des activités du GIS RAMEAU.

Les progrès instrumentaux effectués dans le cadre de l'ORE-BEAM en matière d'automatisation et de miniaturisation serviront à compléter utilement l'instrumentation des réseaux de surveillance, souvent limités à des mesures sol.

Dans le cadre des études sur le climat, des réseaux de monitoring de l'environnement et de la pollution se mettent en place aux plans européen et international en association avec la mise en place de banques de données gérées par des grands centres (CNES, ADEME...). Les données acquises par l'ORE-BEAM seront intégrées dans ces futurs projets (GMES,...).

GRANDEURS MESUREES

1. Observations in-situ

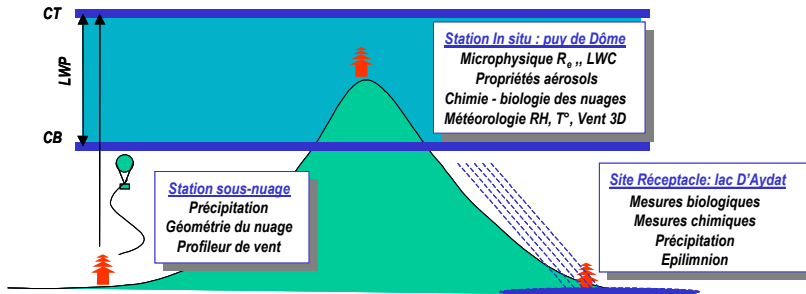


Figure 1 : Déploiement instrumental proposé pour les mesures en continu.

Les développements de la station du puy de Dôme, relatifs à la mise en place de l'ORE-BEAM seront axés à la fois sur la mise en place de systèmes de mesure en continu des paramètres microphysiques des nuages (rayon moyen des gouttes, quantité d'eau liquide, géométrie du nuage) ainsi que sur l'échantillonnage en

continu de la phase condensée à des fins d'analyses chimique et biologique. Cette dernière opération demandera en outre le développement de capteurs stériles adaptés à l'échantillonnage de matériel biologique. L'accessibilité du site étant limitée en hiver, il sera nécessaire de prévoir pour ces capteurs des adaptations pour en augmenter l'autonomie.

L'objectif est donc à terme de faire du site du puy de Dôme une station de référence pour la mesure de la composition chimique de bruit de fond de la troposphère libre, à la fois pour des composés gazeux et particulaire tout en maintenant sa spécificité de site d'étude des systèmes nuageux. La station aura donc pour vocation de documenter en continu la variabilité bio-physico-chimique des nuages mais aussi de devenir un site d'accueil pour les scientifiques impliqués dans l'étude des nuages naturels. Des prises d'entrée d'air qualifiées sont disponibles pour de nouvelles instrumentations. Au cours des 5 dernières années, 15 groupes de recherche en France ou à l'étranger ont participé aux opérations scientifiques au puy de Dôme.

Les mesures existantes au puy de Dôme (voir Tableau 1) seront complétées à la fois pour permettre une meilleure caractérisation de la géométrie des nuages et pour développer les aspects échantillonnage et mesure en continu de la phase liquide à des fins d'analyses chimiques et biologiques.

En complément du Tableau 2, les mesures au puy de Dôme permettront :

- La détermination de la base du nuage par céliométrie,
- La détermination de l'épaisseur de nuage (pour des nuages peu épais) par radiométrie,
- La détermination de la microphysique du nuage (diffraction),
- L'échantillonnage de la phase liquide (en nuage chaud).

Notons enfin que certaines mesures devront être dupliquées pour assurer une caractérisation des deux phases (condensées et interstitielles) des nuages.

Le lac d'Aydat est un lac dimictique, eutrophe et d'une profondeur maximale de 15,50 m. Les surfaces du lac et de son bassin versant sont respectivement de $60,3 \times 10^4 \text{ m}^2$ et $30 \times 10^6 \text{ m}^2$. Ce lac a été retenu pour ce projet de recherche car il a fait l'objet depuis près de 30 ans de programmes scientifiques qui visaient à établir le fonctionnement de ce système lacustre soumis au phénomène d'eutrophisation. L'eau lacustre et les eaux précipitantes seront prélevées pour analyses ultérieures en laboratoire.

Au niveau de l'épilimnion du Lac d'Aydat, les paramètres physicochimiques mesurés classiquement en limnologie seront pris en compte (Intensité lumineuse et pénétration dans l'eau, température, pH, oxygène, azote, phosphore, turbidité, disque de Secchi, etc...). De plus, les activités de production primaire phytoplanctonique et de production bactérienne seront mesurées in-situ.

2. Analyses en laboratoire

=> Pour la structure des communautés de microorganismes dans le lac, les nuages et les précipitations:

- Dénombrement total des virus, bactéries hétérotrophes, levures et champignons
- Dénombrement de groupes et classes bactériens (eubactéries, sous-classes alpha et bêta des protéobactéries, groupe des *Cytophaga-flavobacterium*)

- Dénombrement des protozoaires flagellés et ciliés, et des rhizopodes

=> Pour le fonctionnement des communautés de microorganismes dans le lac et les précipitations:

- Mesure de l'activité lytique
- Mesure de la production bactérienne
- Dénombrement des bactéries CTC actives
- Activités métaboliques bactériennes : activités glycolytiques et protéolytiques.

=> Pour le fonctionnement des communautés de microorganismes dans les nuages et les précipitations:

- Description qualitative de la présence de souches microbiennes capables de croître sur divers substrats (formaldéhyde, méthanol, hydrocarbures, dérivés de CFC, dérivés de diméthylsulfure)
- Identification et quantification des souches isolées présentant une capacité biodégradative (xénobiotiques) dans divers échantillons de nuages et précipitations.
- Analyse qualitative des espèces chimiques formées (métabolites) lors de la biodégradation des composés étudiés par les souches isolées (expériences en laboratoire)
- Influence de la composition chimique de l'eau des nuages sur l'efficacité des biodégradation (données sous forme de cinétiques de dégradation).

=> Pour la chimie des nuages et des précipitations, les grandeurs suivantes seront mesurées :

- pH
- conductivité
- Mise en évidence et dosage des espèces ioniques (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , acides mono- et di-carboxyliques $\text{C}_2\text{-C}_5$, ...) par chromatographie ionique (détection par conductivité).
- Mise en évidence de composés organiques (phénols, nitrophénols, ...) par HPLC couplée avec une détection UV-visible équipée d'une barrette de diodes
- HCHO, formaldéhyde
- Carbone organique dissout (TOC ET DOC)
- Fe(III)/Fe(II)
- H_2O_2 .

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

L'ORE va documenter, caractériser et quantifier les propriétés de l'eau sous l'influence des activités humaines que nous venons de décrire sous diverses situations environnementales :

- **périodes hivernales/estivales**
- **périodes diurnes/nocturnes**
- **périodes polluées (masses d'air continentales)/peu polluées (masses d'air maritime)**
- **périodes de fertilisation/non-fertilisation agricole**
- **périodes de brassage des eaux lacustres.**

Ces contrastes vont permettre d'établir la contribution relative de différents effets anthropiques (pollution locale et grande échelle, tourisme, agriculture, rejets accidentels...) sur l'eau. Ils seront documentés par des campagnes intenses bi-annuelles qui viendront compléter les mesures en continu telles qu'elles existent déjà à la station du puy de Dôme.

Les protocoles expérimentaux de l'ORE-BEAM devront permettre de répondre aux objectifs scientifiques développés précédemment, qui consistent à documenter et *quantifier l'impact de modifications environnementales d'origine anthropique sur le transfert et les processus de transformation d'espèces chimiques dans l'eau atmosphérique et ses conséquences* sur le climat, sur la capacité oxydante de la troposphère et sur la biodégradabilité d'espèces anthropiques.

Une démarche opérationnelle a été mise en place au cours de 3 dernières années sur le site d'observation du puy de Dôme pour contrôler et valider les données expérimentales mesurées systématiquement en continu et sera étendue au Lac d'Aydat, notamment pour le prélèvement des précipitations. Cette démarche inclut des opérations régulières de maintenance de l'instrumentation (calibrage, intercomparaison de l'instrumentation) sur site et au laboratoire, des vérifications sur site ou par analyse des données du fonctionnement des capteurs (instrumentation, prise d'entrée d'air, etc...) et une analyse des covariations des différents facteurs pour détecter un éventuel artéfact dû à une perturbation locale des mesures.

Des prélèvements réguliers de phase aqueuse du nuage seront réalisés au sommet du puy de Dôme avec des impacteurs à nuage mis au point par le LaMP. Ces impacteurs à nuage se composent d'une unique plaque d'impaction en Téflon ou en inox protégée d'un écran contre le vent permettant leur utilisation avec des vitesses de vent très élevées. Le flux d'air est aspiré par une fissure dans la partie supérieure d'un cylindre en aluminium et les gouttelettes aspirées viennent se condenser sur la plaque d'impaction et sont ensuite collectées dans un récipient situé sous la plaque.

Avec ces échantillons d'eau du nuage de nombreuses mesures physicochimiques (pH, conductivité, température, potentiel d'oxydoréduction, ...) et chimiques (TOC/DOC, Fe(II), Fe(III), H₂O₂, HCHO, ...) seront réalisées. Nous travaillerons sur un ou des composés organiques particuliers (acides mono- et di-carboxyliques, dérivés du phénol, dérivés des nitrophenols, ...) afin de suivre leur évolution suivant les différents paramètres analysés dans le nuage.

Notre approche de photochimistes sera fondée sur des expériences de laboratoire réalisées dans des enceintes d'irradiation afin de reproduire la lumière solaire. Nous suivrons l'influence de l'irradiation lumineuse (intensité, longueur d'onde) sur la composition de la phase aqueuse atmosphérique. Ces expériences consistent tout d'abord à regarder le comportement de la phase aqueuse du nuage lorsqu'il est soumis à une irradiation lumineuse. En particulier et pour commencer le comportement du couple Fe(III)/Fe(II), l'évolution des différents constituants suivis dans notre étude, l'effet sur le peroxyde d'hydrogène, sur le formaldéhyde, sur certains acides carboxyliques et dicarboxyliques, seront analysés afin de connaître les mécanismes photochimiques et les espèces radicalaires prépondérants dans ce milieu particulier. Tous ces paramètres devront être suivis simultanément afin de pouvoir donner une réponse globale sur le comportement photochimique de la phase aqueuse. Des expériences de RPE seront également réalisées afin de piéger les espèces radicalaires primaires lors du processus photochimique.

L'originalité du travail en laboratoire sur la photo-réactivité des systèmes réside dans le fait que les études seront menées sur des échantillons réels prélevés au sommet du puy de Dôme.

Dans une deuxième étape, un composé organique bien ciblé et à des concentrations compatibles avec le milieu sera ajouté dans la phase aqueuse du nuage. Le devenir de ce composé sera suivi sous différentes conditions et bien sûr sous irradiation lumineuse. Ces expériences devraient nous

aider à donner une réponse sur les capacités oxydante et photo-oxydante (ou de self régénération) du milieu.

En ce qui concerne l'étude de la **structure des communautés de microorganismes** :

- **Les "virus-like particles" (VLP)** sont dénombrés en microscopie à épifluorescence à l'aide du fluorochrome Yo-Pro après coloration à chaud des échantillons (Xenopoulos et Bird, 1997) selon un protocole décrit par ailleurs (Bettarel et al, 2000). L'abondance virale est déterminée à l'aide d'un microscope à épifluorescence Olympus HB2 sous lumière bleue à un grossissement 1000.
- **Le dénombrement total des levures et champignons** se fera par culture classique sur milieux sélectifs et comptage des colonies (CFU).
- **Les bactéries hétérotrophes** sont dénombrées en microscopie à épifluorescence après coloration au DAPI (Porter et Feig, 1980). L'analyse des communautés bactériennes se fait à l'aide d'un système d'analyse d'images, au moyen d'une caméra Sony 3 CCD (DXC 950P), fixée sur un microscope inversé à (épifluorescence Leitz Weitzlar). Le traitement est réalisé à l'aide du logiciel Leica Qwin fonctionnant sous Windows 95.

La méthode FISH (Fluorescent in Situ Hybridization), décrite par Alfreider et al. (1996), qui permet d'étudier la structure de la communauté bactérienne sera utilisée. Les sondes oligonucléotides, marquées avec l'indocarbocyanine fluorescente CY3 (excitation à 552 nm, émission maximum à 568 nm) (Glöckner et al., 1996), s'hybrident sur les ARNr qui sont des sites naturellement amplifiés des bactéries. Par la molécule ciblée, cette méthode permet une étude phylogénétique (Pernthaler et al., 1996) puisque sa structure générale est en grande partie conservée chez les procaryotes, tout en présentant des zones variables d'un genre ou d'une espèce à une autre. Les groupes ainsi définis rassemblent des bactéries aux formes, aux physiologies et aux métabolismes très divers (Jürgens et al., 1999). L'intensité du signal dépend directement du contenu cellulaire en ARNr, et donc de l'activité cellulaire (Boye et al., 1995). Dans cette étude nous caractériserons :

- la sous-classe alpha des protéobactéries, ALF 1b, complémentaire de l'ARNr 16S, entre les positions 19 et 35, de séquence CGT TCG YTC TGA GCC AG,
- la sous-classe bêta des protéobactéries, BET 42a, complémentaire de l'ARNr 23S, entre les positions 1027 et 1043, de séquence GCC TTC CCA CTT CGT TT,
- le groupe des Cytophaga-flavobacterium (CF), CF 319a, complémentaire de l'ARNr 16S, entre les positions 319 et 336, de séquence TGG TCC GTG TCT CAG TAT C,
- les Eubactéries, EUB 338, complémentaire de l'ARNr 16S, entre les positions 338 et 355, de séquence GCT GCC TCC CGT AGG AGT.

Le protocole est subdivisé en trois étapes qui sont respectivement l'hybridation, le lavage, et la coloration pour le double marquage avec du DAPI (concentration 4 µg.ml⁻¹).

- **Les Protozoaires flagellés et ciliés et les Rhizopodes** seront identifiés et dénombrés en microscopie à épifluorescence et inversée après fixation à la glutaraldéhyde (Bloem et al., 1986; Simé-Ngando, 1991, Carrias, 1996).
- **Des courbes de corrélation** seront tracées reliant les données quantitatives obtenues ci-dessus avec des données physiques et chimiques obtenues par les autres partenaires du programme.

Pour étudier le fonctionnement des communautés de microorganismes, différents types de mesures sont envisagées :

- **Mesure de l'activité lytique**

L'activité lytique sera déterminée en dénombrant les bactéries infectées par des virus après concentration des échantillons sur des grilles par ultracentrifugation à 70 000 g pendant 30 min. à 15°C (Simé-Ngando et al., 1996). Chaque grille est ensuite colorée à l'acétate d'uranyle pendant 30 secondes, puis examinée à l'aide d'un microscope électronique JEOL 1200 EX à un grossissement de x 25000. Les bactéries présentant des phages intracellulaires matures sont ensuite dénombrées. Le nombre total de bactéries infectées est estimée à partir du pourcentage de bactéries infectées observé et en utilisant le facteur de conversion proposé par Binder (1999) qui prend en compte la durée du cycle lytique.

- **Mesure de la production bactérienne et des bactéries actives**

La mesure de la production bactérienne se fera par incorporation de thymidine tritiée (Kirchman et al., 1982)

Les bactéries actives du point de vue de la chaîne des transporteurs d'électrons (bactéries CTC actives) seront également dénombrées (Zimmerman et al., 1978).

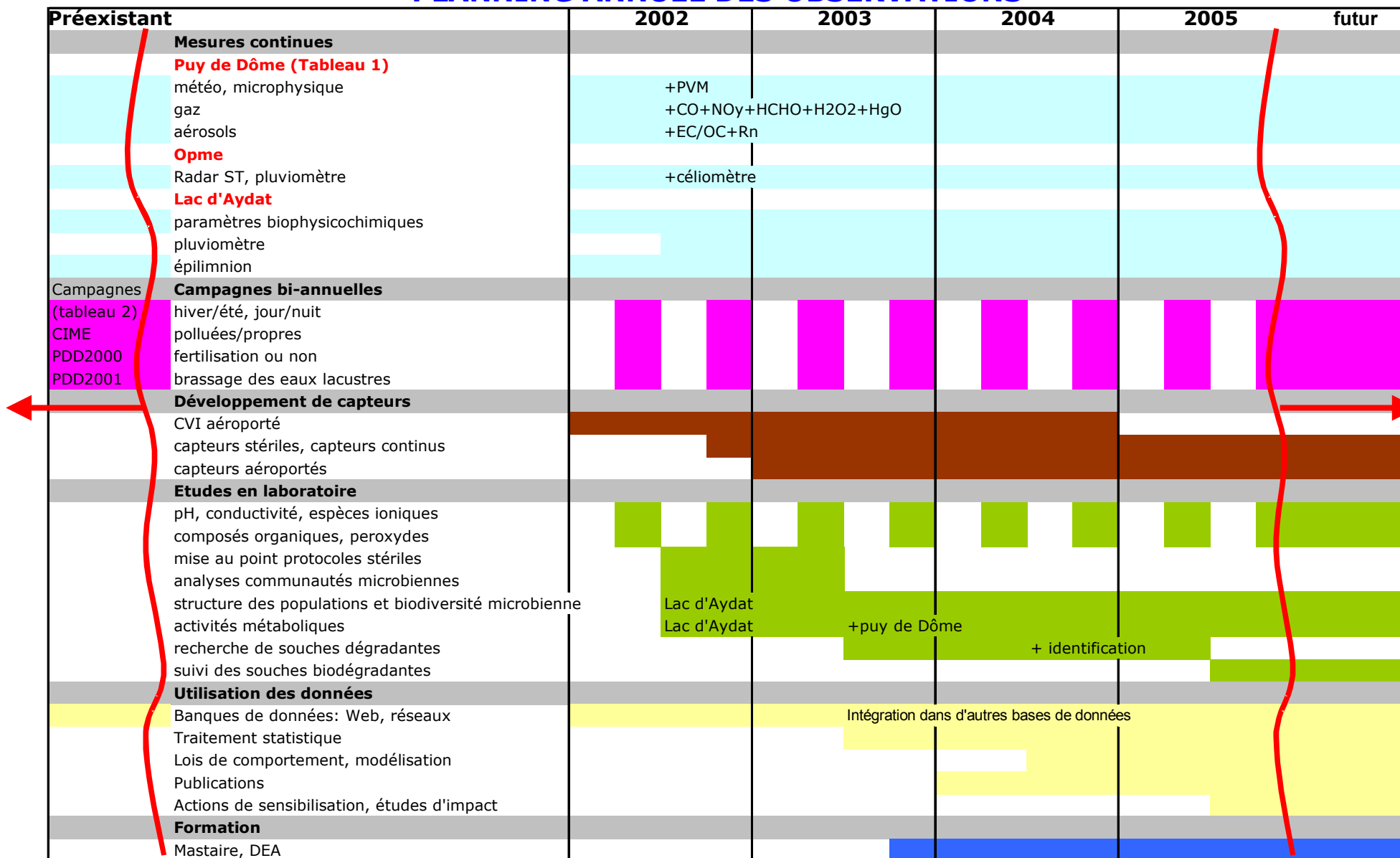
- **Mesure des activités de dégradation enzymatique**

Les activités glycolytiques et protéolytiques de la matière organique seront mesurées par spectrofluorométrie selon les protocoles décrits par Chròst (1991).

Enfin, **pour étudier le potentiel biodégradatif de ces communautés**, nous effectuerons :

- **La recherche de souches** dégradant divers substrats (formaldéhyde, méthanol, hydrocarbures, dérivés de CFC, dérivés de diméthylsulfure) se fera par mise en culture et enrichissements successifs sur milieux contenant spécifiquement ces substrats.
- **La caractérisation des souches** microbiennes isolées se fera par séquençage de l'ARN 16S et analyse phylogénique.
- **Des sondes spécifiques** oligonucléotidiques correspondant aux souches isolées et caractérisées précédemment seront synthétisées (synthèse commerciale). Ces sondes seront ensuite utilisées pour suivre spécifiquement ces populations dans les nuages et précipitations (méthode FISH, voir plus haut).
- **L'étude de la biodégradation** des divers substrats par les souches isolées se fera dans des conditions contrôlées de laboratoire (*méthode classique développée au SEESIB*). Chaque souche sera mise en croissance pour augmenter la biomasse puis les cellules seront concentrées (resting cells) et incubées dans un tampon contenant le substrat d'intérêt. Différentes méthodes analytiques seront mises en œuvre pour caractériser les produits formés : HPLC ou CPG, spectrométrie de RMN et de masse. Dans certains cas la spectroscopie de RMN sera utilisée *in situ* directement sur les milieux d'incubation.
- **Différents paramètres chimiques** seront testés sur l'efficacité de biodégradation d'un substrat donné par une souche dégradant ce substrat. Par exemple différents échantillons aqueux (nuages et précipitation) pourront servir de milieux d'incubation *in vitro* ou bien un paramètre précis caractéristique dans les nuages (pH, concentration en un élément minéral...) pourra être testé sur les cinétiques de dégradation. Ce paramètre aura été déterminé d'après les corrélations établies précédemment .

PLANNING ANNUEL DES OBSERVATIONS



STRUCTURE SCIENTIFIQUE RESPONSABLE PRINCIPALE ET GESTIONNAIRE

L'OPGC (OSU, UMS 833) apportera le soutien administratif et sera la structure scientifique responsable de l'ORE-BEAM. Son équipe technique (atelier mécanique notamment) sera également mis à disposition de l'ORE-BEAM.

UNITES IMPLIQUEES ET ORGANISMES ASSOCIES

Tous les laboratoires associés à cette demande sont des Unités Mixtes sous la double tutelle de l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand) et le CNRS.

- OPGC : Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, OSU, UMS 833, Université Blaise Pascal
- Directeur : Ariel Provost

- LaMP : Laboratoire de Météorologie Physique UMR CNRS 6016, Université Blaise Pascal
- Directeur : Nadine Chaumerliac
- Equipes : « Observation et expérimentation en microphysique et physico-chimie des nuages » et « Processus physico-chimique dans les nuages »
(responsables : J.F. Gayet et A. Flossmann)

- LBCP : Laboratoire de Biologie Comparée des Protistes UMR CNRS 6023, Université Blaise Pascal
- Directeur : Christian Amblard.
- Equipe : « Biodiversité microbienne et fonctionnement des écosystèmes aquatiques »
(responsable : C. Amblard)

- LPMM : Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macromoléculaire UMR CNRS 6505, Université Blaise Pascal
- Directeur : Jean-Luc Gardette
- Equipe : « Photochimie aqueuse et Environnement »
(responsable : M. Bolte)

- SEESIB : Laboratoire de Synthèse Et Etude de Systèmes à Intérêt Biologique UMR CNRS 6504, Université Blaise Pascal
- Directeur : J. Bolte
- Equipe : « RMN métabolique et environnement » (responsable : A.M. Delort)

MOYENS MATERIELS ET FINANCIERS

	LaMP	LPMM	LBCP	SEESIB
Fonctionnement récurrent annuel TOTAL : 76,5 k€/an	Logistique et maintenance de la station (chauffage, électricité, charges...) : 20 k€ construction de capteurs : matériel électronique et mécanique : 30 k€ Fonctionnement (pompe, filtres,...) : 10k€ Matériel de calibration des sondes : 10 k€	Produits chimiques, gaz, matériel analytique standard, colonne HPLC, solvants, cartouche de purification d'eau, cellules photochimiques, verrerie, etc... : 5 k€	Produits pour biologie moléculaire : 8k€ Filtres : 6k€ Produits chimiques et consommables : 6k€ Frais de déplacement sur le terrain : 8k€	Chimie analytique (RMN, MS) : 3 k€ Microbiologie (Cultures): 1,5 k€ HPLC, CPG (solvants, colonnes): 3 k€ Petit matériel consommable (boîtes de pétri, tubes Eppendorf, pipettes, tubes RMN...): 1,5 k€ Produits chimiques (solvants, xénobiotiques...): 1,5 k€
Total par labo par an	70k€ dont 50k€ demandés	5 k€ demandés	29 k€ dont 14 k€ demandés	10,5 k€ dont 7,5 k€ demandés
Equipements et Infrastructure TOTAL:257,5 k€ sur 4 ans	Equipement détaillés dans les Tableaux 1 et 2 mis à disposition. Particle Volume Monitor: 30 k€. 10 k€ demandés Céliomètre laser: 20 k€. 10 k€ demandés Granulomètre aérosol: 80 k€. 60 k€ demandés Compteur de particules en phase liquide: 40 k€. 20 k€ demandés Mesure de la surface des particules : 30 k€. 20 k€ demandés	HPLC équipée de détecteurs GC, spectrophotomètre UV-visible, RPE, enceintes d'irradiation, analyseur TOC, monochromateurs, , etc. : mis à disposition. Installation d'un laboratoire d'analyse avec paillasses de travail et hottes à flux laminaire. Achat d'un spectrophotomètre UV-visible de terrain : 10k€ Achat d'une chromatographie ionique avec un détecteur par conductivité : 22k€ Module TOC pour les phases solide et gazeuse : 12k€	Microscope Leica DM IRB lumière transmise et fluorescence (+ système d'analyse d'images).: 39 k€. 23 k€ demandés Equipement de biologie moléculaire (thermocycleur) : 8 k€. demandés Participation à l'achat d'un cytomètre en flux: 80k€. 30 k€ demandés appareil à filtration tangentielle pour concentrer les échantillons : 8k€	Autoclaves, incubateurs, hôte à flux laminaire, microscope optique, congélateurs à - 80°C, enceinte climatique. Spectromètre RMN 500 MHz (sonde TXI ¹ H/ ¹⁵ N/ ¹³ C), spectromètre de masse, HPLC (gradients, détecteurs à barrette de diodes) : mis à disposition. Système pour étaler et compter les colonies microbiennes: 14 k€ Incubateur à basse température: 9 k€ Cryo-conservateur (conservation des souches dans N ₂ liquide): 1,5 k€
	200 k€ dont 120 k€ demandés	44 k€ demandés	65 k€ demandés	28,5 k€ demandés

MOYENS HUMAINS

Partenaire	Personnel affecté	Fonction	%
LPMM	Michèle Bolte, DR2 CNRS	Responsable équipe	10
	Gilles Mailhot, CR1 CNRS	Analyses chimiques et détermination des mécanismes photochimiques	40
	Jean-Pierre Aguer, MC	Caractérisation et photoréactivité de la matière organique	20
	Bernadette Lavédrine, Tech IATOS Otman Abida, étudiant en DEA	Analyses chromatographiques Echantillonnage, analyses chimiques	20 100
SEESIB	A.M. Delort, DR2 CNRS	Responsable équipe, métabolisme microbien	10
	P. Besse, CR1 CNRS	Potentiel biodégradatif des micro-organismes	10
	B. Combourieu, MC2	Potentiel biodégradatif des micro-organismes	10
	M. Sancelme, IATOS Etudiant de DEA	Microbiologie, dénombrement microbien	10 100
LBCP	Christian Amblard, DR1 CNRS	Responsable équipe – Ecologie microbienne	15
	Gilles Bourdier, PR1	Marqueurs organiques	10
	Jean-François Carrias, MC	Protistes phagotrophes	10
	Marie Charpin, MC	Production primaire	10
	Didier Debroas, PR	Activités de dégradation bactérienne	10
	Christian Desvilettes, MC	Transferts de matière	10
	Jean Devaux, PR1	Microalgues et production primaire	10
	Gérard Fonty, DR2 CNRS	Bactériologie anaérobie	15
	Télesphore Sime-Ngando, CR1 CNRS	Virologie	15
	Corinne Bardot, AI CNRS	Biodiversité bactérienne	15
	Jean-Claude Romagnoux, IR Denis Sargos, IE	Identification et dénombrement microorganismes Traitement statistique des données	20 20
LaMP	Andrea Flossmann, PR2	Coordination – processus nuageux	10
	Nadine Chaumerliac, DR2 CNRS	Modélisation physicochimique	10
	Paolo Laj, MC2	Instrumentation et Mesures physicochimiques	15
	Alfons Schwarzenböck, MC2	CVI	20
	Wolfram Wobrock, MC2	Modélisation microphysique	15
	Yves Pointin, CR2 CNRS	Radar ST, bases de données	30
	Jean-François Gayet, IR1 CRS	Instrumentation et Mesures microphysiques	10
	Jean-François Fournol, IR1 CNRS	Instrumentation physicochimique	15
	Christophe Gourbeyre, IE2 CNRS	Acquisition et traitement des données	15
	Anne-Marie Lanquette, IEHC CNRS	Base de données, web, informatique	15
	3 étudiants en thèse 1 étudiant en post-doc	Expérimentation physicochimique Modélisation physicochimique	3x100 100
OPGC	Nicole Audiffren, PhA	Mesures continues	15
	Jean-Marc Pichon, IE IATOS	Maintenance et développement capteurs	30
	Georges Dubosclard, PhA	Instrumentation radar	30
	Laurent Cortès, Tech IATOS	Instrumentation, maintenance station	100
	Géraldine Del Campo, Tech IATOS	Gestion, secrétariat	30
	Christian Reymond, Tech IATOS	Entretien, maintenance station	10
	Michel Rahon, Tech IATOS	Mécanique	30
	Philippe Cacault, AI CNRS	Informatique réseau	50
	Personnel demandé dans le cadre du projet		
LPMM/LaMP	Etudiant en thèse		50/50
LBCP	Etudiant en thèse		100
SEESIB/LBCP	Technicien en microbiologie		50/50
	Etudiant en DEA ou thèse/post-doc		100
OPGC/LaMP	Physicien-adjoint		100
	Technicien Mesures Physiques		100

BANQUES DE DONNEES

Les données des différents paramètres mesurés à la station physico-chimique du puy de Dôme, ainsi que les données du radar "profileur de vent", sont d'ores et déjà introduites automatiquement, après leur validation et d'éventuelles corrections manuelles, dans la banque de données locale. Un calendrier et un catalogue montrant la disponibilité des données sont automatiquement générés et, tout comme les tracés graphiques de l'évolution temporelle de chaque paramètre, sont mis à la disposition de la communauté sur le site Web du LaMP/OPGC : www.obs.univ-bpclermont.fr. Un formulaire à remplir interactivement permet de visualiser l'évolution temporelle de n'importe quel paramètre sur n'importe quelle période.

De plus, ces données sont automatiquement introduites dans les tables d'une base de données gérées par un programme SGBD (Système de Gestion de Base de Données) sous le langage normalisé SQL (Structured Query Language). Ce programme permet, à un utilisateur autorisé, d'extraire des données d'une de plusieurs tables, éventuellement en imposant des conditions de date, d'intervalle de temps, de valeurs d'un ou de plusieurs paramètres, en calculant des moyennes, des écarts types, des maxima, etc. Ces données extraites peuvent alors être relues par des logiciels types permettant leur utilisation scientifique (tracé temporel, tracé d'un paramètre en fonction d'un autre, analyse en composantes principales, etc...). Ce programme SGBD permet facilement d'extraire simultanément des données d'instruments différents (de résolution temporelle variée, installé provisoirement, ou de localisation variée comme les instruments emportés par un avion), de tenir compte automatiquement des valeurs aberrantes, de faire des climatologies sur des mêmes types d'épisodes, ou de repérer les dates d'épisodes de valeurs extrêmes.

Les autres données, telles que celles des pluviomètres, peuvent être ajoutées dans des tables spécifiques permettant leur utilisation conjointe avec toutes les données de la base.

La description des tables et des exemples d'ordres d'extraction des données du puy de Dôme et/ou du radar ST "profileur de vent" sont données dans les pages locales sur le site Web du LaMP/OPGC. L'accès à ces pages peut être donné à tout utilisateur autorisé qui en fait la demande.

Des contacts sont actuellement pris pour mettre les données de la station physico-chimique du puy de Dôme à la disposition de la banque de données nationale Ether, qui est une co-production CNES-INSU/IPSL sur la chimie de l'atmosphère (<http://ether.ipsl.jussieu.fr/>).

Les responsables de la base locale sont : P. Laj (MC, scientifique puy de Dôme), A.-M. Lanquette (IE CNRS, informatique), J.-M. Pichon (IE OPGC, instrumentation du puy de Dôme), et Y. Pointin (CR CNRS, scientifique radar et pluviomètres).

Des données biophysicochimiques ayant trait à l'eau du lac d'Aydat et de son principal affluent (La Veyre) ont été recueillies au cours des dernières décennies. Cependant, ces données, qui ont été acquises lors de travaux de thèse, sont discontinues et ne concernent pas toujours les mêmes paramètres. Les paramètres seront cependant ré-examinés et inclus dans la banque de données.

Un lien sera établi avec d'autres banques de données spécifiques à l'eau comme le Réseau National des Données sur l'Eau (RNDE), regroupant des partenaires publics et privés producteurs et utilisateurs de données sur l'eau, qui a été mis en place pour accéder aux informations disponibles, à la fois pour connaître l'état du milieu, orienter des politiques ou en mesurer les effets.

INSERTION DE L'ORE DANS LE TISSU DE LA RECHERCHE, (REGIONAL, NATIONAL OU INTERNATIONAL)

Le volet du projet correspondant à l'impact des précipitations sur le fonctionnement microbiologique d'un milieu récepteur constitue un prolongement et un complément original des travaux conduits dans le cadre d'une ACI d'Ecologie Quantitative du Ministère de la Recherche ayant trait à la « signification fonctionnelle de la biodiversité dans les écosystèmes aquatiques » et dont l'un des laboratoires co-requérants de la présente demande (UMR CNRS 6023 de Biologie des Protistes) a la responsabilité.

Par ailleurs, l'UMR CNRS 6023 de Biologie des Protistes est l'un des trois laboratoires constituant le GDR 2476 qui vient d'être créé par le CNRS sur le thème des réseaux trophiques microbiens aquatiques. Enfin, sur ce même thème, l'UMR 6023 fait partie du PICS (Programme International de Coopération Scientifique) n° 1111 retenu en 2000 par le CNRS et est à l'initiative d'un projet de réseau d'excellence, dans le cadre du 6^{ème} PCRDT, qui doit réunir une quinzaine de laboratoires européens.

L'UMR 6504, le SEESIB et l'UMR 6505, le LPMM font partie de la « Thématique environnement : Devenir et Elimination des polluants » du Pôle Chimie, axe prioritaire « Chimie des transformations et durabilité des matériaux polymères » du Plan Etat-Région de l'Université Blaise Pascal.

L'ensemble des partenaires de l'ORE-BEAM participent au GIS-RAMEAU en liaison avec des problématiques de risque et d'impact.

Le volet correspondant à la physicochimie des nuages et des précipitations s'appuie sur des actions engagées depuis plusieurs années dans le cadre de l'INSU qu'il s'agisse :

- des projets du Programme National de Chimie Atmosphérique (PNCA): Interactions « Nuage/rayonnement/chimie » coordonné par N. Chaumerliac de 1996 à 2000 ou des projets actuels (« Réactivité en phase aqueuse » et « Aérosols »)
- de la participation à des réseaux de mesures systématiques dans le cadre de l'OPGC comme TOR2, RAMCES
- ou encore de la participation à plusieurs ACIs (ACI « Jeune chercheur » de Paolo Laj, ACI « Prévention des catastrophes naturelles ») et programme du Ministère de l'Environnement (PRIMEQUAL).

ARTICULATION AVEC DES OBSERVATOIRES OPERATIONNELS

L'ORE-BEAM, lié au service pré-existant déjà dans le cadre de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand se trouve naturellement articulé avec les services liés à d'autres observatoires comme le Pic du Midi. La station du puy de Dôme doit dans le futur être associée à un réseau de mesures de pollution de fond, qui s'appuiera sur l'ORE-MOZART (Mesures d'Ozone à bord d'Avions Régionaux et de Trains à grande vitesse).

Il est prévu de compléter le service d'observation MOZART à vocation opérationnelle en associant un instrument de mesure en continu des concentrations de CO et aux analyseurs d'ozone existants dans les observatoires d'altitude tels que le Pic du Midi, l'OHP, le puy de Dôme, le Donon, pour avoir une information dans la troposphère libre qui présente une continuité temporelle.

La transmission automatique des données devrait permettre d'alimenter en temps réel une base de données, fournissant ainsi un support essentiel, et unique par ailleurs, aux modèles d'analyse puis aux modèles de prévision de qualité de l'air sur l'ensemble du territoire national grâce aux méthodes d'assimilation en cours de développement. L'objectif étant de permettre, à moyen terme, une prévision opérationnelle de la qualité de l'air, à l'échelle de la France, à l'aide notamment du modèle MOCAGE de Météo-France.

EXPLOITATION ET VALORISATION ATTENDUE DES DONNEES

1. Une base de données ouverte aux utilisateurs

Un suivi continu et régulier des propriétés biophysicochimiques de l'eau permettra d'établir des lois de comportements de ses propriétés en fonction de paramètres clés tels que la température, la pression, l'ensoleillement,... dans le contexte réaliste de l'expérimentation sur le terrain, suivie d'analyses en laboratoire. Ainsi, on peut espérer compléter des données de cinétique chimique existantes par d'autres évaluées in-situ et de valider des lois de comportements pour les modèles de grande échelle.

Les laboratoires susceptibles de bénéficier de ces données sont nationaux et internationaux comme indiqué dans le Tableau 2 de la partie relative aux observations pilotes effectuées au puy de Dôme. Les données générées seront également distribuées sur le site web de l'OPGC et échangées avec des bases de données nationales (ETHER, MEDIAS,...) ou de réseaux (TOR2, RAMCES,...).

En plus de publications dans des revues scientifiques à comité de lecture, des informations régulières seront diffusées sur les données avec guide utilisateur par le biais de notes OPGC.

2. Des activités de modélisation

Sur la base des mesures interdisciplinaires effectuées dans le cadre de l'ORE-BEAM, des activités de modélisation s'effectueront à différents niveaux : modèles biophysicochimiques qui servent à l'interprétation des données acquises par les échantillonneurs et établissent le lien entre les données de laboratoire et les conditions réelles et variables de terrain, modèles microphysiques détaillés fournissant le spectre dimensionnel des aérosols, des gouttes et des cristaux et utiles à la description des processus biophysicochimiques au sein des nuages et de leur évolution.

Ces travaux de modélisation permettront à plus long terme de développer des paramétrisations de la biophysicochimie au sein des nuages qui pourront être introduites dans des modèles de climat régional où l'évaluation du rôle des nuages dans la composition chimique atmosphérique est actuellement critique (IPCC, 2001).

De tels modèles de processus pourront utilement s'appuyer sur l'expérience des proposant et sur les modèles existant en physicochimie des nuages au LaMP.

3. Des activités de formation et de sensibilisation

Ces activités de recherche joueront également un rôle moteur dans le domaine de la formation d'étudiants intéressés par les études pluridisciplinaires de l'environnement et de l'eau. Une proposition de maitrise recherche et de DEA est actuellement à l'étude.

En complément, il faut rappeler que le site du puy de Dôme est un haut lieu touristique, qui a acquis sa notoriété au sein de la communauté scientifique bien avant la création de l'Observatoire (1871) avec la fameuse expérience de Blaise Pascal en 1648. Cette renommée a permis de nombreuses actions de vulgarisation scientifique avec notamment un reportage exclusif dans le cadre des documentaires proposés par l'émission Archimède d'ARTE (Septembre 2001). Un projet d'espace muséographique est actuellement en cours pour le chalet de l'OPGC, mis en œuvre par le Conseil Général du Puy de Dôme et l'Université Blaise Pascal, qui mettrait en scène « l'histoire scientifique du puy de Dôme à travers les expériences de Blaise Pascal ». Des activités pédagogiques de sensibilisation et d'information sont prévues dans ce cadre pour tous publics (scolaires, enseignants, techniciens, élus,...) à l'aide d'initiatives du type CPIE (Centres Permanents d'Initiatives Pour l'Environnement).

4. Des études d'impact

A plus long terme, les données générées par l'ORE-BEAM devraient trouver des utilisateurs potentiels intéressés par des domaines tels que l'agriculture, la gestion des ressources en eau, la protection des monuments historiques, ... D'ores et déjà, le laboratoire GEOLAB (Géodynamique des Milieux Naturels et Anthropisés, UMR 6042 CNRS/Université Blaise Pascal) a manifesté son intérêt pour utiliser les données biophysicochimiques de l'ORE-BEAM pour étudier la dégradation des monuments historiques due aux bactéries et aux espèces chimiques acides. Un intérêt plus prospectif pour le transport et la redistribution de bio-aérosols, vecteurs de bactéries et virus, notamment dans des pays comme l'Afrique pourrait susciter des applications futures intéressantes des recherches effectuées dans l'ORE-BEAM dans le domaine de la santé.

PUBLICATIONS ET THESES DES EQUIPES IMPLIQUEES, CONCERNANT LE DOMAINE SPECIFIQUE DE L'ORE

Laboratoire de Météorologie Physique

5 Publications dans le domaine de la physicochimie des nuages

- Flossmann, A. : Cloud Ice Mountain Experiment (CIME). Final report of CEE contract ENV4-CT95-0012, 112 pp, 1999 .
- Leriche M., N. Chaumerliac, and A. Monod: Coupling quasi-spectral microphysics with multiphase chemistry: A case study of a polluted air mass at the top of the puy de Dôme (France), *Atmos. Environ.* Vol. 35 , No. 32 , p. 5411-5423 (Elsevier), 2001.
- Laj P., A.I. Flossmann, W. Wobrock, S. Fuzzi, G. Orsi, L. Ricci, St. Mertes, A. Schwarzenböck, J. Heintzenberg, H. Ten Brink, 2002 : Behaviour of H₂O₂, NH₃ and black carbon in mixed phase clouds during CIME, *Atmos. Res.*, 58, 315-336.
- Schwarzenböck A., St. Mertes, J. Heintzenberg, W. Wobrock, P. Laj,, 2001: Impact of the Bergeron Findeisen process on the release of aerosol particles during the evolution of cloud ice; *Atmos. Res.*, 58, 295-314.
- Wobrock, W., A.I. Flossmann, M. Monier, J ;M. Pichon, L. Cortez, J.F. Fournol, A. Schwarzenböck, St. Mertes, J. Heintzenberg, P. Laj, G. Orsi, L. Ricci, S. Fuzzi, P. Jongejan, R. Otjes. H. TenBrink, 2002 : The Cloud Ice Mountain Experiment CIME 1998 : Experiment overview and modelling of the microphysical processes during the seeding by isentropic gas expansion. *Atmos. Res.*, 58, 231-266.

5 thèses dans le domaine de la physicochimie des nuages

- Gérémy G. (1999) : Simulation de la Physico-Chimie des nuages qui se forment dans l'écoulement orographique autour du puy de Dôme, Thèse Univ. Blaise Pascal, 171 pp.
- Leriche M.(2000) : Développement d'un modèle de chimie multiphase couplé à un modèle de microphysique quasi-spectral: Application à un événement nuageux échantillonné au puy de Dôme. Thèse Univ. Blaise Pascal, 195 pp.
- Vocourt V.(en cours) : Etude de la phase glace dans les nuages mixtes et les impacts sur la chimie aqueuse, Thèse Univ. Blaise Pascal.
- Dupuy R.(en cours) : Etude expérimentale des interactions aérosols/gaz/nuages, Thèse Univ. Blaise Pascal.
- Sellegri K. (en cours, prévue Juin 2002) : Etude multi-composantes des aérosols dans les nuages: efficacités de lessivage et bilans de masse, Thèse Univ. Blaise Pascal.

Laboratoire de Biologie des Protistes

5 publications récentes dans le domaine de la biodiversité microbienne aquatique

- Bettarel Y, Sime-Ngando T, Amblard C, Laveran H. : A comparison of methods for counting viruses in aquatic systems. *Applied & Environmental Microbiology* 66: 2283-2289, 2000.
- Carrias JF, Serre JP, Sime-Ngando T, Amblard C. : Distribution, size and bacterial colonization of pico and nano detrital organic particles (DOP) in two lakes of different trophic status. *Limnology & Oceanography*, in press.
- Jugnia L. B., Tadonleke R. D., Sime-Ngando T., & Devaux J. : The microbial food web in the recently flooded Sep Reservoir: diel fluctuations in bacterial biomass and metabolic activity in relation to phytoplankton and flagellate grazers. *Microbial Ecology* 40 : 317-329, 2000.
- Richardot M, Debroas D, Thouvenot A, Sargos D, Berthon JL, Devaux J. : Influence of cladoceran grazing activity on dissolved organic matter, enzymatic hydrolysis and bacterial growth. *Journal of Plankton Research*, 23: 1249-1261, 2001.
- Véra A, Desvilettes C, Bec A, Bourdier G. : Fatty acid composition of freshwater heterotrophic flagellates: an experimental study. *Aquatic Microbial Ecology* 25: 271-279, 2001.

5 thèses dans le domaine de la biodiversité microbienne aquatique

- Gilbert D. (1998) : Les communautés microbiennes à la surface des tourbières à sphaignes : structure, fonctionnement et impact des apports de fertilisants. Thèse Univ. Blaise Pascal, 133 pp.
- Domaizon, I. (1999) : Impacts de la carpe argentée, *Hypophthalmichthys molitrix*, sur l'organisation des communautés planctoniques et la qualité de l'eau. Expériences en mésocosmes. Thèse Doctorat de l'Université B. Pascal, 140 pp.
- Thouvenot, A. (1999) : Prédation des organismes de la boucle microbienne par le zooplancton métazoaire dans un réservoir nouvellement mis en eau. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal, 122 pp.
- Jugnia L.B. (1999) : Importance quantitative et fonctionnelle des peuplements bactériens planctoniques dans un réservoir récemment mis en eau. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal, 118 pp.
- Richardot M. (2000) : Contrôle de la dynamique de la communauté bactérienne hétérotrophe dans un réservoir nouvellement mis en eau (Massif Central, France). Thèse de Doctorat de l'Université Jean Monnet de Saint Etienne, 120 pp.

Laboratoire SEESIB

5 publications récentes dans le domaine du métabolisme bactérien et environnement

- Combourieu, B., P. Besse, M. Sancelme, H. Veschambre, A.-M. Delort, P. Poupin and N. Truffaut : Morpholine degradative pathway of *Mycobacterium aurum* MO1. Direct evidence of intermediates by in situ ^1H NMR. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64, 153-158, 1998.
- Poupin, P., N. Truffaut, B. Combourieu, P. Besse, M. Sancelme, H. Veschambre and A.-M. Delort : Degradation of morpholine by an environmental *Mycobacterium* strain involves a cytochrome P-450. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64, 159-165, 1998.
- Combourieu, B., P. Besse, M. Sancelme, J.-P. GODIN, A. MONTEIL, H. Veschambre and A.-M. Delort. Common degradative pathways of morpholine, thiomorpholine and piperidine by *Mycobacterium aurum* MO1 : evidence from ^1H -Nuclear Magnetic Resonance and Ion Spray Mass Spectrometry performed directly on the incubation medium. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66, 3187-3193, 2000.
- Delort, A.-M., and B. Combourieu : Microbial degradation of xenobiotics. In "NMR in Microbiology : Theory and Applications", Ed. J.N. Barbotin and J.C. Portais, Horizon Scientific Press (U. K.), Chap. 19, pp 411-430, 2000.
- Besse, P. B. Combourieu, G. Boyse, M. Sancelme, H. De Wever and A.-M. Delort : Long-range ^1H - ^{15}N heteronuclear shift correlation at natural abundance: a tool to study benzothiazole biodegradation by two *Rhodococcus* strains. *Appl Environ. Microbiol.*, 67, 1412-1417, 2001.

5 thèses dans le domaine du métabolisme bactérien et environnement

- Materon C. (1997) Etude du métabolisme azoté et carboné de *Fibrobacter succinogenes*, bactérie cellulolytique du rumen par RMN ^1H , ^{13}C , ^{31}P et ^{23}Na . Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal.
- Combourieu B. (1999) Etude par RMN ^1H *in situ* de la dégradation d'hétérocycles azotés de type morpholine par des *Mycobactéries*. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal.
- Tixier C. (1999) Photo et biotransformation de trois herbicides de type phénylurée : structure, synthèse et écotoxicité des intermédiaires, études sur le terrain. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal.
- Haroune N. (depuis octobre 2000) Etude par RMN de la biodégradation de benzothiazoles 2-substitués par des souches de *Rhodococcus*. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal.
- Nouaille R. (depuis octobre 2000) Etude de la biodégradation de fibres végétales par *Fibrobacter succinogenes*. Approche par RMN liquide et solide. Thèse Doctorat de l'Université Blaise Pascal.

Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macromoléculaire :

5 publications dans le domaine de la photochimie aqueuse et environnement

Andrianirinarivelo S.L., Pilichowski J-F. and M. Bolte: Nitrilotriacetic acid transformation photo-induced by complexation with iron(III) in aqueous solution. *Transition Met. Chem.*, 18, 37-42, 1993.

Brand N., G. Mailhot and M. Bolte: Degradation photoinduced by Fe(III) : method of alkylphenol ethoxylates removal in water, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 2715-2720, 1998.

Mailhot G., Astruc M. and M. Bolte: Degradation of tributyltin chloride in water photoinduced by iron(III)., *Appl. Organometal. Chem.*, 13, 53-61, 1999 .

Mazellier P., and M. Bolte: Heterogeneous light-induced transformation of 2,6-dimethylphenol in aqueous suspensions containing goethite. *J. Photochem. Photobiol.*, A, 132, 129-135, 2000.

Bajt O., G. Mailhot, and M. Bolte: Degradation of dibutyl phthalate by homogeneous photocatalysis with Fe(III) in aqueous solution, *Appl. Catalysis B : Environmental*, 33, 239-248, 2001.

5 thèses dans le domaine de la photochimie aqueuse et environnement

Andrianirinarivelo S.L., 31 janvier 1992. Phototransformation des acides aminopolycarboxyliques induite par complexation avec le fer(III) et le cuivre(II) en solution aqueuse.

Machado F., 21 février 1994. Réactions photochimiques induites sur les composés phénoliques par excitation des ions nitrate et nitrite en solution aqueuse.

Aguer J.P., 13 octobre 1995. Caractérisation des espèces réactives mises en jeu dans les transformations photoinduites par les acides humiques. Comparaison entre les acides humiques naturels et synthétiques.

Mazellier P., 5 décembre 1997. Dégradation de polluants organiques photoinduite par le fer(III) en phase aqueuse.

Vialaton D., 15 septembre 2000. Phototransformation de polluants aromatiques dans l'eau. Influence de la matière organique naturelle. Evaluation de leur photodégradabilité en lumière solaire.