

Retombées atmosphériques humides en France entre 1993 et 1998



DONNÉES ET RÉFÉRENCES

Coordination technique de la surveillance de la qualité de l'air



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



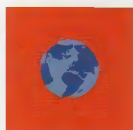
**Mines
de Douai**

La Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) confie à l'ADEME une mission de coordination technique du dispositif de surveillance. L'ADEME anime également des activités de R&D dans le domaine de l'évaluation des risques et de la surveillance de la pollution atmosphérique. Elle gère une base nationale de données sur la qualité de l'air (BDQA) et conduit des actions d'information et de communication, en complément de celles menées par les AASQA, qui assurent une mission de même nature dans leurs zones de compétences territoriales.

L'ADEME et l'ONF apportent leur soutien aux réseaux de mesure MERA et CATAENAT, dont il est question dans ce document. Ces dispositifs permettent de documenter la qualité de l'air dans des zones éloignées de sources de pollution, complétant ainsi la surveillance mise en œuvre par les AASQA.

Retombées atmosphériques humides en France entre 1993 et 1998

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie
Direction de l'Air et des Transports
Département Air
27, rue Louis-Vicat - 75015 Paris
Tél. : 01 47 65 20 00 - Fax : 01 47 65 20 35



Office National des Forêts
Département Recherche et Développement
Boulevard de Constance
77300 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 25
Fax : 01 64 22 49 73



École des Mines de Douai
Département Chimie et Environnement
941, rue Charles Bourseul
BP 838 - 59508 Douai Cedex
Tél. : 03 27 71 26 36
Fax : 03 27 71 25 25

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Photo de couverture : ADEME/René Bertramo

© ADEME Éditions, Paris, 2002.

ISBN 2-86817-582-1

Réf. : 3940 - 30 €



Auteurs :

Erwin Ulrich

Office National des Forêts,
département recherche et développement

Patrice Coddeville

École des Mines de Douai,
département chimie et environnement

Marc Lanier

Office National des Forêts,
département recherche et développement



Sommaire

Remerciements.....	VIII
Résumé.....	XII
Abstract.....	XV
Zusammenfassung.....	XVIII
1. Introduction.....	1
2. Contexte européen.....	5
3. Présentation des réseaux français de mesure des retombées atmosphériques.....	9
3.1 MERA.....	12
3.2 CATAENAT.....	17
3.3 Méthodes d'échantillonnage et d'analyse des précipitations.....	19
3.3.1 Méthodes d'échantillonnage des retombées humides.....	
<i>stricto sensu</i> dans les réseaux MERA et CATAENAT.....	19
3.3.2 Méthodes d'échantillonnage des retombées totales.....	
dans le réseau CATAENAT.....	22
3.3.3 Transport des échantillons et analyses chimiques.....	23
4. Évolution des concentrations et dépôts de 1993 à 1998.....	25
4.1 Évolution des concentrations moyennes annuelles.....	26
4.1.1 Retombées humides <i>stricto sensu</i>	26
4.1.2 Retombées totales.....	30
4.1.3 Tendances pluriannuelles des concentrations de 1993 à 1998.....	44
4.2 Évolution des dépôts annuels.....	46
4.2.1 Retombées humides <i>stricto sensu</i>	46
4.2.2 Retombées totales.....	49
4.2.3 Tendance des retombées annuelles de 1993 à 1998.....	68

5. Comparaisons avec des mesures équivalentes réalisées en Europe	71
6. Comparaison des retombées humides <i>stricto sensu</i> avec le modèle EMEP ..	75
7. Conclusions	79
8. Perspectives	83
Bibliographie.....	87
Glossaire	95
Annexes	101
1. Données de concentrations moyennes pondérées des précipitations	
<i>stricto sensu</i> (réseaux MERA ET CATAENAT)	102
2. Données de concentrations moyennes pondérées des précipitations	
totales (réseau CATAENAT)	105
3. Données de dépôts annuels <i>stricto sensu</i> (réseaux MERA ET CATAENAT)	110
4. Données de dépôts totaux annuels (réseau CATAENAT)	113
Adresses des implantations de l'ADEME	119

Remarque : les mots accompagnés par le signe [] sont définis dans le glossaire.

The background of the page is a solid olive green. It is decorated with two large, organic, wavy shapes in a light blue color. One shape is located in the upper right quadrant, and the other is in the lower left quadrant. The word "Remerciements" is printed in a white, serif font, centered horizontally and positioned between the two blue shapes.

Remerciements



Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement Monsieur Denis Savanne (ADEME) qui a été l'initiateur de cette publication. Par son ouverture d'esprit, qui s'est entre autres traduite par une aide efficace, il nous a permis de réaliser cet ouvrage. Mesdames Nathalie Poisson et Laurence Galsomies de l'ADEME nous ont beaucoup aidé lors de la finalisation de ce document et nous les en remercions vivement.

La qualité des données de mesures des retombées atmosphériques, diffusées aux niveaux national et international, est l'objectif premier des réseaux MERA et CATAENAT. Cette qualité est le fruit du travail sérieux et consciencieux, mené chaque semaine par les opérateurs des stations et le personnel du laboratoire d'analyses (groupe des laboratoires Wolff-Environnement, Service de L'Air, M. Genet, Mmes Drab et Grillas).

Malgré les contraintes imposées quant à l'heure de relevé des flacons, aux procédures de contrôle d'échantillonnage et à la rédaction des fiches de renseignements, la compétence et la motivation de chaque opérateur sont une garantie du bon fonctionnement du réseau MERA.

Nom station	Organisme gestionnaire	Personnel
Le Casset	Parc National des Écrins ASCOPARG	MM. Baisset, Juge M. Pellan
Donon	ASPA	MM. Elsass, Fiegel, Dumortier
Bonnevaux	ARPAM	MM. Dufay, Cordier
Iraty	CDERE / AIRAQ	MM. Teyssiere, Cordebeuf, Chassaigne, Vives
Morvan	ATMOSF'AIR BOURGOGNE	MM. Sarrazin, Virly
Revin	EDF Atmo Champagne-Ardennes (ex-ARSQA)	M. Voisin M. Noël
Brotonne	AIRNDORMAND	M. Desrue
La Crouzille	ALGADE	M. Francillon
La Hague	COGEMA	MM. Marie, Cadiou
Peyrusse Vieille	ORAMIP	MM. Hostallier, Schmeitzky, Nechele

Les responsables et suppléants de l'Office National des Forêts appartenant au réseau CATAENAT (liste ci-contre) réalisent hebdomadairement, depuis fin 1992, des mesures et des échantillonnages, en respectant un protocole très strict de nettoyage et de maintenance des dispositifs de collecte. Nous les remercions beaucoup de leur motivation constante pour ce travail de bonne qualité.

Code placette	Niveau	Responsable		Suppléant	
CHP 40	2	Jean-Louis	Tastet	Hervé	Paquien
CHP 59	3	Régis	Lannoy	Philippe	Jacquet
CHS 35	2	Patrick	Chefson	Michel	Lemoine
CHS 41	3	Francis	Poitrenaud	Alain	Letellier
CPS 77	3	Jean	Prigent	Jean-Denis	Berger
DOU 71	2	Pascal	Marvin	Fabrice	Bardiau
EPC 08	3	Joël	Clamart	Philippe	Lecomte
EPC 63	3	Jean-Pierre	Chassagne	Louis	Vial
EPC 74	2	Bernard	Comte	Daniel	Jallud
EPC 87	3	Gilles	Fournel	Pierre	Debernard
HET 30	3	Guy	Monzo	Eric	Verne
				Francis	Milhau
HET 54a	3	Claude	Bernardin	Bruno	Rossi
				Guy	Deleglise
HET 64	3	Dominique	Chevrier	Patrick	Lussiez
PL 20	2	Jean-Luc	Helec	M.	Riesterer
		Rodolphe	Montus	Jean-Noël	Marchesi
				Stéphane	Touraud
PM 17	3	Jacques	Gauvrit	Serge	Chaigneau
PM 40c	2	Pierre	Jaegy	Ramuntcho	Telechea
		Bernard	Faure		
		Jean-Michel	Reculeau		
PM 72	2	Patrice	Chagnoleau	Bernard	Serain
PM 85	3	François	Trottet	Daniel	Cacault
PS 44	2	Joël	Belloir	Alain	Leboucher
PS 67a	3	Jean-Pierre	Thomassin	Bernard	Mahler
PS 76	2	Benoît	Rasse	Pierre	Hensel
		Nicolas	Barray		
SP 05	3	Jean-Albert	Bernard	Jean-Marie	Blanc
SP 11	3	Jean-Luc	Fiol	Thiery	Noblecourt
SP 25	2	Bernard	Menigoz	Claude	Messenger
SP 38	3	Jean-Pierre	Vincent	Marc	Daugeron
SP 57	3	François	Mouchot	Roland	Frey
SP 68	3	Paul	Riedinger	Marc	Weibel

The background of the page is a solid olive green. It is decorated with two large, organic, wavy shapes in a light blue color. One shape is located in the upper right quadrant, and the other is in the lower left quadrant. They appear to be liquid or cloud-like in form.

Résumé



Résumé



Introduction

Les réseaux MERA (MEsures des Retombées Atmosphériques), coordonné par l'ADEME et le Ministère de l'Environnement et géré par l'École des Mines de Douai, et CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes NAturels Terrestres), géré par l'Office National des Forêts, sont les deux seuls réseaux à vocation nationale réalisant des mesures de retombées atmosphériques humides en France. Le réseau MERA mesure les retombées humides *stricto sensu* [5] dans 10 stations rurales. Le réseau CATAENAT mesure les retombées humides totales [6] dans 27 stations de type forestier et les retombées humides *stricto sensu* dans 8 des 27 stations. Les deux réseaux fonctionnent d'après des protocoles d'échantillonnage et un programme assurance qualité d'analyse communs stricts.



Objectifs

Les objectifs de cette publication sont les suivants :

1. présenter l'évolution de la **qualité** des retombées atmosphériques et leur **quantité annuelle** pour la période 1993 à 1998 ;
2. essayer d'appréhender les effets éventuels de ces retombées sur les écosystèmes forestiers français ;
3. comparer ces flux aux mesures équivalentes effectuées dans d'autres pays d'Europe et aux flux estimés par le modèle EMEP (European Monitoring and Evaluation Program).



Résultats

pH et dépôts de protons (H^+). Le pH moyen des six années de mesures est de 5,1 et fluctue, en moyenne annuelle, entre 4,6 et 6,1. Par rapport au pH mesuré à l'équilibre de l'eau pure avec le CO_2 de l'air, sans pollution, ($pH = 5,5$ à $5,6$), les pluies sont donc en général acides, puisque plus de 50 % ont un pH inférieur à celui du niveau de fond. Dans seulement 12 % des stations on observe une augmentation du pH de 1993 à 1998, le reste étant trop variable pour en extraire une tendance. Selon le type de dépôt (total ou *stricto sensu*), les dépôts de protons [15] se situent en moyenne à respectivement 102 et 114 g/ha/an et fluctuent entre 6 et 611 g/ha/an. Il y a une tendance vers des

apports plus élevés à l'Est et dans le Nord de la France. Il n'y a pas eu d'augmentation ni de diminution de ces dépôts durant ces dernières années.

Sulfate (SO_4). C'est le composé clairement identifié de la pollution industrielle, dont une partie des concentrations provient de l'enrichissement par les embruns marins. Le sulfate montre une concentration moyenne pluriannuelle en soufre de 0,47 mg S/L (*stricto sensu*) et 0,59 mg S/L (total). Les dépôts annuels de soufre se situent entre 2 et 24 kg/ha, avec une moyenne pluriannuelle de 5 kg/ha/an (*stricto sensu*) et 6,7 kg/ha/an (total). Les valeurs sont plus élevées dans des sites situés sous le vent de grands complexes industriels, même s'ils sont très éloignés, et dans des régions à forte précipitation annuelle (beaucoup de pluie, même de faible concentration, apporte sur l'année beaucoup de soufre). On observe une amorce de diminution des concentrations (sur 36 % des sites) et des dépôts (sur 19 % des sites) de soufre, qui peut être interprétée comme le fruit de la réduction de ces émissions depuis environ 20 ans.

Nitrate (NO_3). Il est émis principalement par les transports automobiles. Il montre une concentration moyenne pluriannuelle en azote de 0,27 mg N/L (*stricto sensu*) et 0,3 mg N/L (total). Les dépôts annuels d'azote se situent entre 1 et 11 kg/ha, avec une moyenne pluriannuelle de 2,8 kg/ha/an (*stricto sensu*) et 3,5 kg/ha/an (total). Les dépôts sont en général plus élevés dans le grand quart Nord-Est de la France, ce qui est notamment lié à la plus forte densité de population participant au trafic automobile et en partie aux contributions transfrontières belges et allemandes. Le nitrate ne montre une tendance vers une diminution que pour les dépôts d'azote (dans seulement 19 % des sites).

Ammonium (NH_4). C'est le composé majeur issu des activités d'origine agricole (élevage et fertilisation). Il montre une concentration moyenne pluriannuelle en azote de 0,47 mg N/L (*stricto sensu*) et 0,45 mg N/L (total). Les dépôts annuels en azote se situent entre 1 et 14 kg/ha/an, avec une moyenne pluriannuelle de 4,9 kg/ha/an (*stricto sensu*) et 5 kg/ha/an (total). Les concentrations *stricto sensu* ne montrent pas de variabilité spatiale. En revanche, les concentrations totales sont plus importantes dans les régions à agriculture intensive (l'ammonium se dépose plus près de son lieu d'émission que les autres composés) : le Nord, les Ardennes (influence belge), la Bretagne, la Lorraine et le Massif Central. Les dépôts annuels ont tendance à être plus importants à l'Est, ce qui est certainement lié à une pluviosité plus élevée. On observe une tendance vers une diminution des concentrations d'azote liées à l'ammonium dans 39 % des sites et des dépôts dans 27 % des sites, le reste ayant une grande variabilité inter-annuelle.

Sodium et chlorure. Indicateurs de l'influence marine, leurs concentrations et dépôts sont donc plus élevés à proximité de la mer et montrent une variabilité de concentrations

inter-site et inter-annuelle très forte. Le sodium et le chlorure ont une concentration moyenne pluriannuelle de 0,86 mg /L (Na) et 1,57 mg /L (Cl) (*stricto sensu*) et 1,17 mg /L (Na) et 2,03 mg /L (Cl) (total). Leurs dépôts annuels se situent respectivement entre 1 et 65 kg/ha (Na) et 1 et 114 kg/ha (Cl), avec une moyenne pluriannuelle respectivement de 9,9 et 17 kg/ha/an (*stricto sensu*) et 12,2 et 21,1 kg/ha/an (total). Aucune tendance n'est observée.

Calcium, magnésium, potassium. Ces indicateurs d'origine principalement terrigène (poussières, érosion) ont des concentrations moyennes annuelles variant entre 0,08 mg /L et 0,54 mg /L, les plus faibles valeurs correspondant au potassium et les plus fortes au calcium. Le magnésium se situe au milieu de cette gamme. Leurs dépôts annuels varient entre 0,05 et 11,9 kg/ha/an (*stricto sensu*) et 0,1 et 27,1 kg/ha/an (total), avec la même répartition que pour les concentrations. Mis à part le magnésium, qui est plus important à proximité de l'Atlantique, ces dépôts ne montrent aucune différence longitudinale ou latitudinaire. Ni les concentrations, ni les dépôts annuels ne montrent une tendance temporelle claire.



Effets sur les écosystèmes forestiers

D'après Croisé *et al.* (2002), un dépassement des charges critiques d'acidité directe, de sulfate et d'azote est probable dans plusieurs régions.



Comparaison avec d'autres pays européens

La gamme des dépôts français est globalement comparable à celle des autres pays, mais la comparaison se heurte à la densité de sites, très différente d'un pays à l'autre, ce qui diminue la qualité de cette comparaison.



Comparaison avec le modèle EMEP

Le modèle EMEP semble surestimer les retombées humides (*stricto sensu*) réelles pour le sulfate et le nitrate. Il semble être plus réaliste pour l'ammonium dans la gamme des retombées moyennes, zone qui couvre la plus grande partie du pays. En revanche, les zones de très faibles ou très fortes retombées semblent encore poser des problèmes à la modélisation EMEP au niveau de la France.



Abstract



Introduction

There are only two networks in France which are presently carrying out measurements on precipitation nation-wide: the MERA network (Mesures des Retombées Atmosphériques) under the auspices of the École des Mines in Douai, and the CATAENAT network (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes Naturels Terrestres) which is managed by the Office National des Forêts (ONF: National Forest Office). The MERA network measures wet-only precipitation at 10 measuring rural stations. The CATAENAT network measures bulk precipitation at 19 measuring stations and wet-only and bulk precipitation at 8 other stations. The two networks use a common sampling protocol and apply the same strict quality controls to the analyses.



Objectives

This report has the following objectives:

1. to present the changes in the quality and in the annual quantity of precipitation from 1993 to 1998;
2. to attempt an interpretation of the possible effects of this precipitation on the French forest ecosystems;
3. to compare these results to corresponding measurements from other European countries and to the figures projected by the EMEP model.



Results

pH and proton (H^+) deposition. The average pH for the six year period stands at 5.1 and the annual averages fluctuate between 4.6 and 6.1. In comparison to a pH measured in pure water and balanced with CO_2 in the atmosphere and with no pollution (pH = 5.5 to 5.6), the rains were generally revealed to be acidic since more than 50% to 60% of the precipitation had a pH value below this reference level. An increase in pH from 1993 to 1998 was observed at only 12% of the measuring stations; the other results were too variable to show a clear tendency. Depending on the type of deposition (wet-only or bulk), the proton deposition [15] were respectively between 102 and 114 g/ha/year on

average and fluctuated between 6 and 611 g/ha/year. Higher concentrations tended to occur in the East and the North of France. No noticeable increase or decrease was recorded over the last few years.

Sulphate (SO_4). Even though this compound has been clearly linked to industrial pollution, a part of the concentrations come from dispersal of ocean spray. The pluri-annual mean concentration for sulphur was 0.47 mg S/L (wet-only) and 0.59 mg S/L (bulk). Annual deposition ranged from 2 to 24 kg/ha, with a pluri-annual average of 5 (wet-only) and 6.7 kg/ha/year (bulk). The values were higher at sites located down-wind from industrial complexes, even when they were quite distant and even if annual precipitation in the region was heavy (frequent rains, even with low concentrations, deposit large quantities of sulphur over a year's time). Sulphur concentrations (36% of the sites) and deposition (19% of the sites) were beginning to decline; this may be the result of a reduction in sulphur emissions over the last 20 years.

Nitrate (NO_3). This is the key compound characteristic of automobile pollution. Annual nitrogen concentrations from nitrate were 0.27 mg N/L (wet-only) and 0.3 mg N/L (bulk). Annual deposition ranged from 1 to 11 kg/ha/year with a pluri-annual average of 2.8 (wet-only) and 3.5 kg/ha/year (bulk). Deposition was generally higher in and around the north-eastern quarter of France due to higher population density and the subsequent increase in automobile traffic, accentuated by the Belgian and German long-range transport of pollutants. Nitrate deposition showed a tendency to decrease, and only in 19% of the sites.

Ammonium (NH_4). This compound is the main indicator of agricultural activity (especially livestock production). There was a pluri-annual mean concentration for nitrogen from ammonium of 0.47 mg N/L (wet-only) and 0.45 mg N/L (bulk). The annual deposition ranged from 1 to 14 kg/ha/year with a pluri-annual average of 4.9 (wet-only) and 5 kg/ha/year (bulk). The wet-only concentrations did not vary from one area to the next. However, bulk concentrations were higher in regions with intensive agriculture (ammonium is deposited closer to its source point than the other compounds): the North, the Ardennes region (under the Belgian influence), Brittany, Lorraine and the Massif Central. Annual deposition tended to be higher in the East, which is undoubtedly linked to the higher average rainfall. A decline was observed in ammonium concentrations in 39% of the sites, and in deposition in 27% of the sites. The other figures varied too much from year to year to show any clear tendencies.

Sodium and chloride. As indicators of a marine influence, their concentrations and deposition are therefore higher near the sea and for this reason, they have extremely variable

rates of concentration depending on the site and the year. Sodium and chloride respectively were at pluri-annual mean concentrations of 0.86 mg /L and 1.57 mg /L (wet-only) and 1.17 mg /L and 2.03 mg /L (bulk). Annual deposition ranged from 1 to 65 kg/ha (sodium) and from 1 to 114 kg/ha (chloride) with a pluri-annual average of respectively 9.9 and 17 kg/ha/year (wet-only) and 12.2 and 21.1 kg/ha/year (bulk). No clear trends were observed.

Calcium, magnesium, potassium. These indicators are generally of terrestrial origin (dust, erosion). Their annual mean concentrations varied from 0.08 mg /L to 0.54 mg/L, with the lowest values for potassium and the highest values for calcium. Magnesium was in between. The annual deposition varied from 0.05 to 11.9 kg/ha/year (wet-only) and from 0.1 to 27.1 kg/ha/year (bulk), with the same ranking as for the concentrations. Except for magnesium, which was found at higher levels near the Atlantic Ocean, there are no variations according to longitude or latitude. No clear trends were shown either for annual concentrations or deposition.



Effects on forest ecosystems

According to Croisé *et al.* (2002), critical threshold levels for direct acidity, sulphate and nitrogen have probably been exceeded in several regions.



Comparison with other European countries

Generally speaking, the range of deposition rates for France is comparable to that of other countries, however site densities are very different from one country to the next and this factor reduces the validity of the comparison.



Comparison with the EMEP model

The EMEP model seems to overestimate the wet-only precipitation rates for sulphate and nitrate. The model seems more realistic for ammonium in the average precipitation zone which covers most of the country. On the other hand, zones in France with very light or very heavy precipitation do not seem to correspond well to the EMEP model.



Zusammenfassung



Einführung

Das MERA-Meßnetz (nationales Meßnetz zur Messung der atmosphärischen Depositionen), welches von der École des Mines (Ingenieursschule) in Douai (im Norden Frankreichs) geleitet wird und das CATAENAT-Meßnetz, welches von den französischen Staatsforsten geleitet wird, sind die einzigen beiden französischen Meßnetze auf dem Gebiet der atmosphärischen Depositionsmessung mit landesweitem Ausmaß. Das MERA-Meßnetz mißt die "Wet-only" Depositionen auf 10 Freilandstationen. Das CATAENAT-Meßnetz mißt die "Bulk-" oder Totaldepositionen auf 27 Freilandstationen und zusätzlich die "Wet-only" Depositionen auf 8 der 27 Stationen. Beide Meßnetze verfügen über ein vergleichbares und striktes Qualitätskontroll- und Qualitätsanalyseprogramm.



Ziele dieser Publikation

1. Die Entwicklung der Qualität der atmosphärischen Depositionen von 1993 bis 1998 zu dokumentieren ;
2. Eventuelle Effekte dieser Depositionen auf die französischen Waldökosysteme zu interpretieren ;
3. Die gemessenen Depositionen mit vergleichbaren Messungen in Europa und mit dem EMEP-Modell zu vergleichen.



Ergebnisse

pH-Wert und Protonendeposition (H^+). Der mittlere sechsjährige pH-Wert liegt bei 5,1 und variiert im Jahresmittel, je nach Station, zwischen 4,6 und 6,1. Verglichen mit dem pH-Wert in einem reinen Wasser, welches mit dem CO_2 -Gehalt der Luft im Gleichgewicht ist (pH zwischen 5,5 und 5,6), sind die Niederschläge generell sauer, da 50 bis 60 % einen pH-Wert unter dem "natürlichen" Wert haben. In nur 12 % der Stationen beobachtet man einen Anstieg des pH-Wertes von 1993 bis 1998. In den anderen Fällen variiert der pH-Wert zu stark um eine Tendenz festzustellen. Je nach Depositionstyp (Wet-only oder Bulk) variieren die Protonendepositionen im Gesamtittel zwischen 102 und 114 g/ha/Jahr und je nach Station zwischen 6 und 611 g/ha/Jahr. Eine Tendenz zu höheren Depositionen im Osten und

Norden Frankreichs wurde festgestellt. Die Depositionen, im Gegensatz zu den 12 % der pH-Werte zeigen keine Tendenz zu einer Zu- oder Abnahme.

Sulfat (SO_4). Dies ist ein eindeutig von der industriellen Verschmutzung stammender Bestandteil ; ein Teil seiner Konzentrationen stammt jedoch von der Meeresgischt. Das Sulfat zeigt ein langjähriges Mittel für Schwefel von 0,47 mg S/L (Wet-only) und 0,59 mg S/L (Bulk). Die Schwefeldepositionen liegen zwischen 2 und 24 kg/ha/Jahr, mit einem langjährigen Jahresmittel von 5 (Wet-only) und 6,7 kg/ha/Jahr (Bulk). Die Depositionen sind höher bei Stationen, die sich im Lee von grösseren Industriekomplexen befinden, selbst wenn sie von diesen Komplexen weit entfernt sind, und in Regionen mit sehr hohen Jahresniederschlägen (viel Niederschlag, selbst mit geringen Konzentrationen, führt zu hohen Sulfatdepositionen). Man kann einen Beginn einer Abnahme der Sulfatkonzentrationen (36 % der Stationen) und depositionen (19 % der Stationen) beobachten, welcher als Ergebnis der Emissionsreduktionen, die seit 20 Jahren durchgeführt werden, angesehen werden kann.

Nitrat (NO_3). Das Nitrat ist vor allem an die durch den Verkehr verursachte Luftverschmutzung gebunden. Das Nitrat zeigt eine langjährige mittlere Stickstoffkonzentration von 0,27 mg N/L (Wet-only) und 0,3 mg N/L (Bulk). Seine jährlichen Stickstoffdepositionen schwanken zwischen 1 und 11 kg/ha/Jahr, mit einem langjährigen Gesamtittel von 2,8 (Wet-only) und 3,5 kg/ha/Jahr (Bulk). Die Werte sind im allgemeinen höher im nord-östlichen Teil Frankreichs. Dies ist vor allem auf die höhere Bevölkerungsdichte und mit dem erhöhten Verkehr in diesen Regionen, aber auch teilweise auf die grenzüberschreitenden Beiträge aus Belgien und Deutschland zurückzuführen. Das Nitrat zeigt nur bei den Jahresdepositionen und da nur auf 19 % der Stationen eine abnehmende Tendenz.

Ammonium (NH_4). Dieser Bestandteil ist hauptsächlich auf die landwirtschaftliche Tätigkeit (Viehzucht und Düngung) zurückzuführen. Es zeigt langjährige mittlere Stickstoffkonzentration von 0,47 mg N/L (Wet-only) und 0,45 mg N/L (Bulk). Seine Stickstoffdepositionen variieren zwischen 1 und 14 kg/ha/Jahr, mit einem langjährigen Jahresmittel von 4,9 (Wet-only) und 5 kg/ha/Jahr (Bulk). Die Wet-only-Konzentrationen zeigen keine regionalen Variationen. Dagegen sind die Bulk-Konzentrationen in den Regionen mit intensiver Landwirtschaft höher (das Ammonium tendiert zur Deposition in der näheren Umgebung der Emissionsstelle) : im Norden, in den Ardennen (belgischer Einfluß), in der Bretagne, in Lothringen und im Zentralmassif. Die Jahresdepositionen sind höher im Osten des Landes, welches wahrscheinlich mit den höheren Jahresniederschlägen in Verbindung steht. Eine Tendenz zur Abnahme der Ammonium-Konzentrationen wurde auf 39 % und der Depositionen auf 27 % der Stationen festgestellt. Auf den restlichen Stationen zeigten das Ammonium eine zu starke Variation.

Natrium und Chlor. Beide sind Indikatoren des Meereseinflusses. Ihre Konzentrationen und Jahresdepositionen sind deshalb höher in der Nähe der Meere (Atlantik und Mittelmeer) und sie zeigen eine starke Variation zwischen den Jahren und zwischen den Stationen. Ihre langjährigen mittleren Konzentrationen sind respektive 0,86 mg/L (Na) und 1,57 mg/L (Cl) (Wet-only) und 1,17 mg/L und 2,03 mg/L (Bulk). Ihre Jahresdepositionen schwanken respektive zwischen 1 und 65 kg/ha (Na) und 1 und 114 kg/ha (Cl), mit einem langjährigen Gesamtmittel von 9,9 (Na) und 17 kg/ha/Jahr (Cl) (Wet-only) und 12,2 (Na) und 21,1 kg/ha/Jahr (Cl) (Bulk). Keine Tendenz wurde für diese Ionen festgestellt.

Kalzium, Magnesium und Kalium. Es handelt sich hauptsächlich um Ionen natürlichen Ursprungs (Staub, Erosion). Die Konzentrationen dieser Ionen schwanken zwischen 0,08 mg/L und 0,54 mg/L. Die geringeren Werte sind eher gültig für Kalium und die höheren Werte für Kalzium. Das Magnesiumion hat Konzentrationen die sich zwischen den anderen beiden Ionen befinden. Die Jahresdepositionen dieser Ionen variieren zwischen 0,05 und 11,9 kg/ha/Jahr (Wet-only) und 0,1 und 27,1 kg/ha/Jahr (Bulk), mit der gleichen Werteverteilung wie für die Konzentrationen. Abgesehen vom Magnesium, welches höhere Werte in Atlantiknähe zeigt, zeigen die anderen beiden Ionen keine regionalen Unterschiede. Weder die Konzentrationen, noch die Jahresdepositionen zeigen eine klare Tendenz.



Einfluß auf die Waldökosysteme

Gemäß Croisé *et al.* (2002) ist eine Überschreitung der "critical loads" für direkte Säureinträge, für das Schwefel und für den Stickstoff in mehreren Regionen anzunehmen.



Vergleich mit anderen europäischen Ländern

Die Bandbreite der französischen Jahresdepositionen ist generell vergleichbar mit jener der anderen Länder, aber der Vergleich ist nicht ausgeglichen, aufgrund sehr unterschiedlicher Meßnetzdichten zwischen den Staaten, welches die Qualität eines solchen Vergleiches mindert.



Vergleich mit dem EMEP-Modell

Was das Sulfat und Nitrat betrifft, scheint das EMEP-Modell die Wet-only-Depositionen zu überschätzen. Was das Ammonium betrifft, scheint das Modell realistischer betreffend die mittleren Werte zu sein, die den grössten Teil des Staatsgebietes betreffen. Dagegen sollte das Modell, was die französischen Regionen mit sehr geringen oder sehr hohen Werten betrifft, auf französischer Ebene noch optimiert werden.



1

Introduction

1

Introduction



La pollution atmosphérique a atteint ces dernières décennies un niveau préoccupant dans tout l'hémisphère Nord du globe, ainsi que dans une partie de l'hémisphère Sud. Cette pollution est une conséquence de l'industrialisation qui, après avoir débuté au milieu du siècle dernier, a vu son développement s'accroître depuis la fin de la deuxième guerre mondiale. Les origines de cette pollution sont multiples : industrie, transformation d'énergie et centrales thermiques, chauffage, trafics routier et aérien, élevages intensifs et fortes fertilisations en agriculture, etc... Pour tenter d'y remédier, l'ensemble des pays industrialisés a mené depuis environ 20 ans une politique de réduction des émissions de plus en plus sévère à l'égard des grands émetteurs. Si cette politique a permis une nette diminution de certains polluants atmosphériques tels que les composés soufrés, leur niveau reste néanmoins suffisamment élevé pour conserver un effet néfaste aussi bien sur la santé humaine que sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. Pour d'autres polluants, on observe toujours que leurs concentrations atmosphériques continuent d'augmenter, comme c'est le cas pour l'ozone (O_3) et autres photo-oxydants, les composés organiques volatils (COV) ou encore les oxydes d'azote (NO_x).

On peut distinguer trois types de pollution atmosphérique, avec des modes d'action et des effets variant en fonction des récepteurs (homme, animal, plante, construction...) :

1. Les gaz (ozone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ammoniac, composés organiques volatils) : la voie de pénétration est le plus souvent les poumons chez l'homme et l'animal, et les stomates [16] ou la surface du feuillage chez les plantes. Dans les cas de fortes concentrations [3], on peut observer chez l'homme une irritation des muqueuses, des problèmes respiratoires notamment chez les asthmatiques, ou encore un effet cancérogène des composés organiques. Des effets directs des gaz sur les plantes sont actuellement observés, en particulier pour l'ozone car c'est le seul composé dont les concentrations augmentent de 1 à 3 % chaque année : nécroses plus ou moins fortes accompagnées de pertes en biomasse (allant jusqu'à 30 % par rapport à des concentrations naturelles d'ozone). Le dioxyde de soufre, mesuré depuis le début des années 60 et reconnu pour avoir aussi des effets directs sur l'homme et la plante, a vu ses concentrations fortement baisser ces vingt dernières années.

2. Les poussières : leur mode d'action consiste en une pénétration dans les poumons chez l'homme et les animaux et en un dépôt sec sur les constructions, les surfaces aquatiques et le feuillage des plantes (pouvant aller jusqu'au colmatage des stomates).

3. Les précipitations [14] *acidifiantes, parfois enrichies en éléments traces métalliques ou en composés organiques* : leur toxicité résulte de l'absorption de poussière et de gaz solubles par les gouttelettes d'eau durant le déplacement du nuage (notamment les gaz azotés et le dioxyde de soufre). Les **précipitations acidifiantes** peuvent avoir un effet direct de corrosion sur les bâtiments et les monuments historiques. Elles peuvent également avoir des effets indirects, qui ne sont pas pour autant négligeables, sur les écosystèmes : acidification des sols et des eaux de surface. Cette acidification provoque une perte de biodiversité dans les lacs et rivières et un déséquilibre nutritif dans divers écosystèmes sensibles, notamment forestiers. Dans des cas extrêmes, on observe une diminution du nombre de plantes, d'insectes et d'oiseaux, un changement de la chimie et de l'évolution des sols, ainsi que des carences nutritives des arbres forestiers. Les **éléments traces métalliques** apportés par les précipitations présentent, du fait de leur non biodégradabilité, des dangers liés à leur accumulation notamment dans les sols et à leur transfert au sein des écosystèmes. Ainsi, l'apport atmosphérique de mercure dans les lacs de Scandinavie et du Nord des États-Unis s'est traduit par des niveaux de concentration, dans la chair des poissons, dangereux pour la santé humaine et pour la reproduction des poissons et mammifères piscivores. L'effet des éléments traces métalliques sur la santé des plantes est quant à lui très réduit, le contenu en éléments traces métalliques étant fortement lié à la circulation des poussières dont les émissions ont baissé de plus de 60 % en 20 ans. Les **composés organiques**, dont les niveaux dans les précipitations sont en augmentation constante, ont plutôt un effet cancérigène sur les hommes et les animaux, mais leurs concentrations dans les précipitations restent en général très faibles.

La surveillance de la qualité de l'air (gaz et poussières) a commencé dans les années 70 et est aujourd'hui bien développée. La Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Énergie de 1996 (LAURE) a donné une plus grande place à la surveillance des régions rurales, en particulier en ce qui concerne l'ozone. Selon le rapport sur la qualité de l'air en France en 1995/96 (ADEME Editions, 1998), la France disposait en 1996 de 1 214 analyseurs et préleveurs automatiques pour la surveillance essentiellement des SO_2 , NO_x et O_3 , la plupart étant installés dans les zones urbaines, semi-urbaines et industrialisées.

En revanche, **la surveillance de la qualité des précipitations** n'a réellement débuté en France que depuis les années 1980. Les premières recherches dans ce domaine en France et en Allemagne, dont les publications sont accessibles encore aujourd'hui, datent du milieu du siècle dernier. La prise de conscience de l'existence d'une source de pollution indirecte et de l'importance du vecteur « précipitation » est en revanche bien plus récente, d'où la mise en place tardive de surveillances nationales en continu. Les pays pionniers dans ce domaine sont la Suède (début des mesures en réseau dans les années 50) et les États-Unis, suivis par les pays de l'Europe Centrale.

La France, quant à elle, a participé au réseau européen de chimie atmosphérique (European Air Chemistry Network), en créant quelques stations dans les années 50 pour mesurer la qualité des précipitations, activité qui a cessé dans les années 60. Depuis 1977, la France participe au réseau mondial GAW (Global Atmospheric Watch), piloté par l'Organisation Mondiale de la Météorologie, avec un nombre de stations variant selon les années de trois à six. D'autre part, sept autres stations françaises contribuent depuis 1984 au réseau européen EMEP (European Monitoring and Evaluation Program), dont l'objectif est de suivre l'évolution de la qualité de l'air à l'échelle européenne (ozone, composés organiques, composés azotés et soufrés, précipitations), afin de pouvoir orienter la politique européenne de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Cette activité est liée au travail de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies, qui a adopté en 1979 une convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, dont EMEP constitue l'un des protocoles d'application.

La présente publication constitue le premier document de synthèse des mesures récentes de la qualité des précipitations et des dépôts [7] annuels, provenant des deux seuls réseaux français à vocation nationale pour ce type de surveillance à long terme : MERA et CATAENAT (voir la description ci-après). Les objectifs de ce document sont :

- présenter l'évolution de la **qualité** des retombées atmosphériques humides et de leur **quantité annuelle** pour la période 1993 à 1998 ;
- essayer d'évaluer, au vu des résultats obtenus, les effets éventuels de ces retombées et leur importance sur les écosystèmes forestiers français ;
- comparer ces flux d'une part aux mesures équivalentes réalisées soit en France (surtout par le passé, et qui n'ont généralement pas été poursuivies ; voir Ulrich et Williot, 1993) soit dans d'autres pays d'Europe, et d'autre part aux sorties du modèle EMEP.



2

Contexte européen

Les résultats des mesures d'éléments majeurs contenus dans les précipitations de 1993 à 1998, présentés en détail dans le chapitre 4, mettent en évidence les différents flux auxquels notre territoire est soumis. Le plus fréquent, et certainement le plus important, est le flux océanique qui transporte des quantités non négligeables de chlorures, sodium, magnésium, potassium et sulfates. Compte tenu de la situation géographique de la France sur le continent européen, et notamment de son importante bordure océanique, ces éléments sont bien répartis sur tout le territoire et contribuent probablement à l'équilibre des écosystèmes. D'autre part, les barrières montagneuses que constituent les Vosges, les Alpes, le Massif Central et les Pyrénées limitent le transport de ces espèces chimiques au delà de nos frontières. Dans le cas d'un régime continental, les précipitations sont essentiellement chargées des éléments nitrates, sulfates, ammonium et H^+ . Ils caractérisent la part acide des précipitations. Enfin, un dernier flux de type méditerranéen génère essentiellement des apports de calcium et magnésium provenant de poussières sahariennes ou encore de l'érosion éolienne, comme il a pu être montré dans des études menées dans le Morvan (Charron *et al.*, 1999, 2000 a,b).

Les retombées au sol de ces différents éléments sont bien sûr dépendantes de la pluviométrie régionale. Les zones soumises à des régimes de pluviosité importante, principalement les parties Nord et Est du territoire, présentent les dépôts acidifiants les plus importants.

La réduction des émissions de soufre et d'azote fait l'objet de négociations au sein de la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies (CEE-ONU) dans le cadre de la Convention de Genève concernant la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Ces négociations ont conduit à des accords internationaux relatifs à la lutte contre ces émissions, basés sur des considérations techniques et économiques. Afin de quantifier les effets des réductions d'émissions, on utilise la notion de « charge critique », représentant la sensibilité de l'environnement, notamment les forêts et les eaux de surface, aux retombées atmosphériques. Cette notion est une estimation quantitative de l'exposition à un ou plusieurs polluants au-dessous de laquelle, selon les connaissances scientifiques actuelles, il ne se produit pas d'effets nocifs appréciables sur des éléments sensibles déterminés de l'environnement (Nilsson et Greenfelt, 1988). C'est ainsi que des charges critiques d'acidité, de soufre et d'azote ont été établies aux niveaux européen (Posch *et al.*, 1995) et français (Party *et al.*, 1997 ; Party, 1999). Les valeurs de dépôts relevées dans les réseaux de surveillance sont ainsi comparées aux charges critiques modélisées.

Afin d'étudier le transport transfrontière dans le cadre du réseau EMEP, le centre météorologique d'Oslo (MSC-W) et l'institut géophysique de Moscou (MSC-E) ont développé un modèle de dispersion des polluants. La grille européenne était constituée dans un premier temps de cellules géographiques de 150 km de côté (Barrett et Sandnes, 1996 ; EMEP/MSC-W, 1997) ; la taille de ces cellules est passée en 1997 à 50 km de côté. La distribution des polluants est déterminée par la combinaison de trois paramètres majeurs : les émissions, les transformations chimiques dans l'atmosphère et les retombées. La météorologie joue un rôle important car elle influence aussi bien le transport des polluants après leur émission que le dépôt en fonction de la distribution des précipitations. Les différentes réactions chimiques entre les polluants modifient la durée de vie des espèces dans l'atmosphère, et par conséquent leur distance de transport et leurs dépôts. Les résultats de la modélisation montrent, pour la quasi-totalité des espèces, un maximum de concentrations et de dépôts en Europe Centrale, région caractérisée par de fortes émissions polluantes. Les concentrations sont moindres sur les autres parties de l'Europe et varient selon un gradient qui dépend du temps de résidence des espèces dans l'atmosphère, des courants aériens des masses d'air et des précipitations.

Le modèle EMEP simule des dépôts d'espèces soufrées (soufre total, marin et non-marin) hors couvert supérieurs à 20 kg/ha/an en soufre S sur le Nord-Ouest de l'Espagne, la Sicile et le Sud-Est de la Grande-Bretagne, mais également aux frontières de certains pays : Pologne, République Tchèque, Slovaquie, Allemagne. Des dépôts de soufre compris entre 10 et 20 kg/ha/an sont calculés sur une large partie de l'Europe centrale et en Grande-Bretagne. Le reste de l'Europe, à l'exception de la Scandinavie et du Sud de l'Espagne, reçoit de 4 à 10 kg/ha/an de soufre. Toujours d'après ce modèle, les dépôts de soufre mesurés en France sont compris entre 1 et 10 kg/ha/an.

Les dépôts d'oxydes d'azote simulés montrent une répartition géographique assez homogène, selon un gradient négatif depuis le Nord, avec un maximum de 10 kg/ha/an d'azote aux frontières de la Belgique, des Pays-Bas, de l'Allemagne, jusqu'au Sud de la France. En France, les dépôts d'oxydes d'azote se situent d'après le modèle entre 1 et 6 kg/ha/an d'azote. Ces dépôts d'azote excèdent rarement 2 kg/ha/an dans la plupart des autres pays.

Les dépôts d'ammonium simulés sont en général plus élevés que ceux d'oxydes d'azote, comme par exemple en France (1 à 14 kg/ha/an d'azote). Des quantités supérieures à 10 kg/ha/an sont dépassées en Belgique, aux Pays-Bas, dans une grande partie de l'Allemagne, au Luxembourg, en Autriche et en Suisse. Les autres pays d'Europe Centrale et de l'Est ne recevraient d'après le modèle que 4 à 10 kg/ha/an d'azote en provenance des dépôts d'ammonium. Ces dépôts ne dépassent pas 1 à 4 kg/ha/an en Espagne, en Italie, en Russie et dans le sud de la Scandinavie.

La détermination des flux transfrontaliers de polluants entre les différents pays européens est calculée à l'aide d'un modèle lagrangien (ROOT-150 : Receptor Oriented One layer Trajectory model). Le tableau 1 résume pour la France les principales contributions des pays, mers et océan voisins aux dépôts atmosphériques soufrés et azotés, estimées par le modèle ROOT-150 (EMEP/MSC-W, 1997). Ce tableau met en évidence que la France contribue pour 33 % à ces propres dépôts soufrés (par comparaison, le Royaume-Uni contribue pour 78 % à ces propres dépôts, l'Espagne pour 67 %, et l'Allemagne pour 59 %). La France reçoit des retombées soufrées principalement d'Allemagne (12 %), de Grande-Bretagne (9 %) et d'Espagne (9 %). Pour les oxydes d'azote, nous contribuons à 33 % à nos dépôts, l'Allemagne et le Royaume Uni contribuant à 11 % chacun et la Mer du Nord, la Méditerranée et l'Océan Atlantique à un total de 23 %, ce qui est loin d'être négligeable. L'essentiel des dépôts d'ammonium en France provient de nos propres sources (81 %).

Contribution de certains pays européens aux dépôts en France	A	B	DK	F	D	I	L	NL	P	E	CH	GB	Somme de ces pays européens (%)	Mer du Nord	Atlantique	Méditerranée
Soufre	0	3	0	33	12	4	0	1	2	9	0	9	73	3	2	1
Oxydes d'azote	0	3	0	33	11	5	0	3	1	6	1	11	74	5	6	12
Ammonium	0	2	0	81	3	2	0	1	0	2	1	2	94	0	0	0

A = Autriche ; B = Belgique ; DK = Danemark ; F = France ; D = Allemagne ; I = Italie ; L = Luxembourg ; NL = Pays-Bas ; P = Pologne ; E = Espagne ; CH = Suisse ; GB = Grande-Bretagne

Tableau 1 : Contributions des pays européens (en %) aux dépôts totaux en France de soufre, oxydes d'azote et ammonium (période 1985-1995) (source : EMEP/MSC-W, 1997).

Table 1: Contributions of European countries (or surfaces) (in %) to total deposition of sulphur, nitrogen oxides and ammonium to France (1985-1995) (source: EMEP/MSC-W, 1997).

Par la suite, les résultats des mesures réelles effectuées en France seront exposés en détail (chapitre 4). Ces résultats seront ensuite discutés et mis en relation avec les données modélisées et mentionnées ci-dessus.



3

Présentation
des réseaux
français de mesure
des retombées
atmosphériques

3

Présentation des réseaux français de mesure des retombées atmosphériques

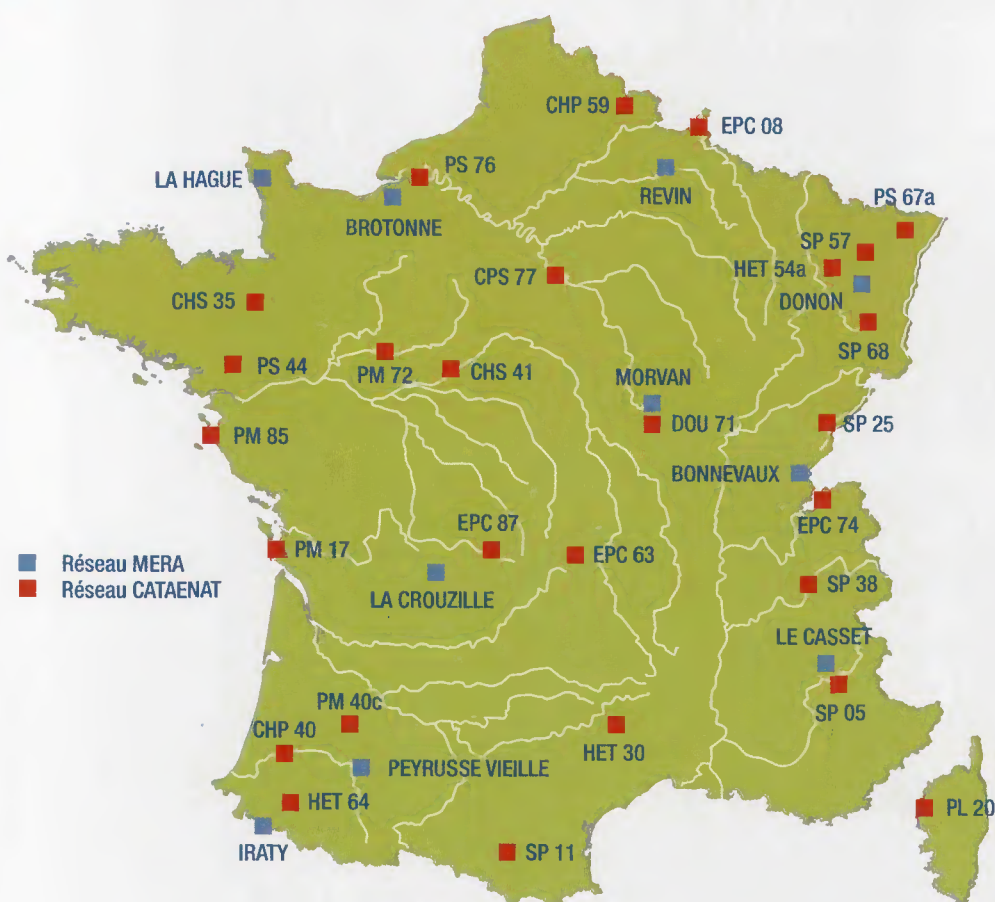


Figure 1 : Localisation des stations de mesure des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 1: Location of the MERA and CATAENAT network measuring stations.

La figure 1 présente l'emplacement des stations de mesure des réseaux MERA (Mesure des Retombées Atmosphériques) et CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes Naturels Terrestres) sur le territoire français en 1998.

Le tableau 2 présente, quant à lui, de manière synthétique, les caractéristiques générales des réseaux MERA et CATAENAT. Les caractéristiques plus spécifiques sont ensuite développées plus en détail.

	MERA	CATAENAT
Objectif de la surveillance	- Évaluer quantitativement les retombées - Étudier le transport des polluants en France et à travers les continents	Établir des connaissances sur l'impact des retombées sur les écosystèmes forestiers, notamment les sols et les déséquilibres nutritifs
Pilotage	ADEME/École des Mines de Douai	Office National des Forêts
Nombre de sites	10	27
Date de création	1984	1992
Type de prélèvement	pluviosité, dépôt humide [5]	pluviosité, dépôt humide [5] et dépôt total [6]
Périodicité d'échantillonnage	journalière	hebdomadaire
Analyse d'échantillons	journaliers	moyens mensuels
Paramètres analysés	précipitation, pH, conductivité, K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, Cl^- , $S-SO_4^{2-}$	précipitation, pH, conductivité, K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, Cl^- , $S-SO_4^{2-}$, alcalinité/acidité
Autres types de mesures ne faisant pas partie de cette publication	SO_2 (capté par barbotage de l'air), soufre particulaire, O_3 , NO_x composés organiques, météo	dépôts sous le couvert forestier, solutions de sol à 20 et 70 cm de profondeur

Tableau 2 : Caractéristiques des deux réseaux de surveillance des retombées atmosphériques à vocation nationale en France.

Table 2: Characteristics of the two french networks dealing with monitoring of atmospheric deposition on a national scale.

Le réseau national de Mesures des Retombées Atmosphériques (MERA) a été créé en 1984 à l'initiative du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) pour étudier l'importance des problèmes de pollution de fond relatifs aux retombées acides. Ses activités se sont étendues depuis peu à la pollution photo-oxydante et aux métaux lourds. Les objectifs de surveillance de ce réseau, dont les stations sont implantées exclusivement en milieu rural, sont tout d'abord d'évaluer quantitativement les retombées atmosphériques. D'autre part, dans le cadre de la convention de Genève de 1979 sur la pollution atmosphérique transfrontalière que la France a ratifiée en 1984, le réseau MERA permet d'étudier le transport des polluants sur de longues distances, d'une région à l'autre, voire d'un pays ou d'un continent à l'autre, en mettant en parallèle les mesures d'autres pays.

Le réseau MERA (figure 1) est constitué de 10 stations régionales de prélèvement réparties sur l'ensemble du territoire national. Ces stations ne doivent pas être sous l'influence directe de sources de pollution locales. Les sites retenus, présentés dans le tableau 3, sont donc représentatifs d'une région donnée, en ce sens que les masses d'air atteignant la station correspondent aux différents flux météorologiques touchant cette région. La majorité des stations du réseau MERA font partie du réseau européen EMEP (European Monitoring and Evaluation Program) qui a en charge de coordonner l'ensemble des partenaires européens. Les données collectées par l'EMEP servent de base à la négociation entre les différents états des protocoles de réduction des émissions, mais aussi à en surveiller la mise en conformité.

Le programme de mesures de base réalisé dans chacune des stations comprend l'analyse physico-chimique des précipitations et la mesure, dans l'air ambiant, des teneurs en dioxyde de soufre gazeux, soufre particulaire et ozone ; des mesures météorologiques sont réalisées en quelques sites. Chaque station est donc équipée au minimum d'un pluviomètre [12] et d'un collecteur de précipitation à ouverture séquentielle qui ne capte que la fraction humide des dépôts. La collecte est réalisée à fréquence journalière pour l'ensemble des sites.

Sur certains sites, des mesures d'autres polluants gazeux tels que les oxydes d'azote, les composés organiques volatils (COV) et les composés carbonylés (aldéhydes, cétones) viennent compléter le programme. Depuis 1999, la majorité des sites de mesure sont de plus équipés pour la mesure de paramètres météorologiques : température, pression, humidité, radiation solaire UV, vitesse et direction du vent.

La coordination du réseau MERA est assurée par l'ADEME qui en confie la responsabilité technique et scientifique au département Chimie et Environnement de l'École des Mines de Douai. Toutes les opérations liées à l'assurance qualité des mesures, à la validation des données et à leur diffusion sont assurées par l'École des Mines de Douai. Un minimum de deux visites de chaque station est effectué chaque année afin de s'assurer de la qualité des prélèvements (contrôle et maintenance du matériel, environnement du site, méthodologie de collecte des échantillons,...). La gestion des stations au quotidien est assurée dans la plupart des cas par les associations de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) agréées par le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. ▽

Nom de la station	Code station	Latitude (°N)	Longitude (°E, °W)	Altitude (m)	Pluiosité moyenne (mm)	Agglomérations les plus proches (distance en km, le site se trouve dans la direction ...)
Le Casset	Cas	44,56	6,31 E	1 750	680	Briançon (16, ESE), Grenoble (60, NW)
Donon	Don	48,30	7,08 E	775	1 650	Strasbourg (46, ENE)
Bonnevaux	Bon*	46,49	6,11 E	836	1 880	Pontarlier (17, NE), Besançon (50, NNW)
Iraty	Ira	43,02	1,05 W	1 300	1 240	Pau (70, NE), Biarritz (70, NW)
Morvan	Mor	47,16	4,05 E	620	1 375	Autun (37, SSE), Dijon (72, W)
Revin	Rev	49,54	4,38 E	390	1 080	Charleville (10, SSE), Charleroi (26, N)
Brotonne	Bro	49,26	0,41 E	115	710	Rouen (30, E), Le Havre (43, WNW)
La Crouzille	Gro	45,50	1,16 E	497	930	Limoges (20, SSW), Guéret (40, NE)
La Hague	Hag	49,37	1,50 W	133	900	Cherbourg (16, E)
Peyrusse Vieille	Pey**	43,63	0,18 E	236	860	Auch (16, W)

* Arrêtée en mars 1998 ; ** Opérationnelle en 1997

Tableau 3 : Localisation des stations de mesure du réseau MERA. Les mesures ont été réalisées en continu dans ces sites de 1993 à 1998.

Table 3: Location of the measuring stations belonging to the MERA-network. The measurements were carried out continuously from 1993 to 1998.

Les sites de mesures du réseau MERA



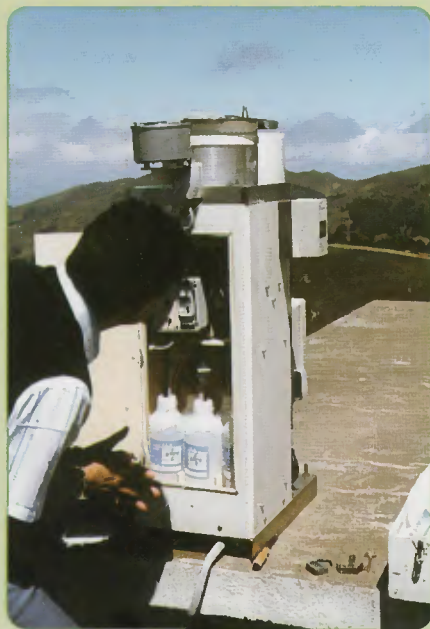
Bonnevaux



Donon



Morvan



Iraty





Le Casset

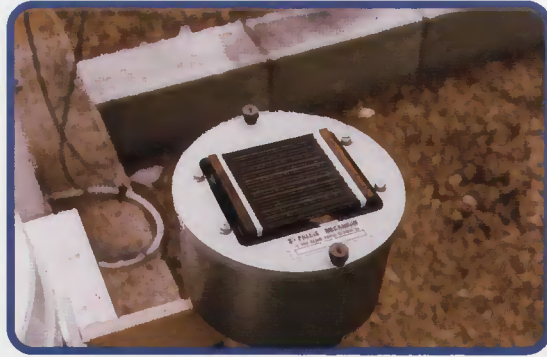
La Hague



Peyrusse Vieille



Collecteur
des
retombées
humides
stricto sensu
du réseau
MERA





CATAENAT

Le réseau CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes Naturels Terrestres - se reporter à la figure 1) est un sous-réseau du réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des Écosystèmes Forestiers ; voir description de ce réseau dans ONF, 1996) géré par l'Office National des Forêts (ONF). L'objectif de CATAENAT est essentiellement d'établir des connaissances sur l'impact des dépôts atmosphériques sur les écosystèmes forestiers, notamment les influences éventuelles sur l'acidification des sols et les déséquilibres nutritifs. Ce réseau a pour origine les recherches menées en France dans le cadre du programme de recherche interministériel DEFORPA (Dépérissement des Forêts et Pollution Atmosphérique, voir ENGREF, 1991). Les mesures ont commencé en novembre 1992 et se sont poursuivies depuis sans interruption.

Le choix des sites CATAENAT a répondu à un triple besoin :

1. être situé dans des régions forestières ;
2. être à côté d'un peuplement forestier dont l'essence principale est représentative de la région ;
3. couvrir aussi bien que possible l'ensemble des grandes régions forestières métropolitaines.

Ce réseau est, entre autres, constitué de 27 stations de collecte des précipitations en plein champ, réparties sur la métropole (tableau 4 et figure 1), où l'on mesure les dépôts totaux. Parmi ces stations, huit sont également équipées pour la mesure des dépôts *stricto sensu* [5], dont certaines fournissent des résultats depuis moins de quatre ans. Les stations de collecte se trouvent toujours dans, ou à proximité d'un massif forestier, car une collecte des précipitations est également réalisée en parallèle dans un site voisin sous couvert forestier. Ces dernières mesures ne seront cependant pas traitées dans le présent document (voir sinon Ulrich et Lanier, 1998).

Le réseau CATAENAT a été financé depuis le début par l'Union Européenne (DGVI), l'Office National des Forêts, le Ministère de l'agriculture et de la pêche (Direction de l'espace rural et de la forêt), l'ADEME et jusqu'en 1997 par le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

Note : Les **codes des stations** sont constitués d'une part d'un préfixe de deux ou trois lettres indiquant une essence forestière surveillée et associée dans le massif forestier à cette station hors couvert forestier et, d'autre part, de deux chiffres indiquant le numéro du département dans lequel la station se situe. Les essences forestières sont : CHP = chêne pédonculé, CHS = chêne sessile, CPS = mélange de chênes pédonculés et sessiles, EPC = épicéa commun, DOU = douglas, HET = hêtre commun, PL = pin laricio, PM = pin maritime, PS = pin sylvestre, SP = sapin pectiné.

Nom de la forêt	Code station	Latitude (°N)	Longitude (°E, °W)	Altitude (m)	Pluiosité moyenne (mm)	Agglomérations les plus proches (distance en km, le site se trouve dans la direction ...)
F.C. de Gamarde	CHP 40	43°44'19" N	0°50'32" W	20	1 166	Dax (17, E); Mont-de-Marsan (32, SW)
F.D. de Mormal	CHP 59 ⁽¹⁾	50°10'16" N	3°45'16" E	149	905	Cambrai (40, E); Valenciennes (24, SE)
F.D. de Rennes	CHS 35	48°10'41" N	1°32'01" W	80	853	Rennes (10, NE)
F.D. de Blois	CHS 41	47°34'09" N	1°15'36" E	127	741	Blois (4, SW); Orléans (60, SW); Tours (50, NE)
F.D. de Fontainebleau	CPS 77	48°27'14" N	2°43'02" E	80	720	Fontainebleau (6, N); Melun (10, SE); Paris (48, SE)
F.D. d'Anost	DDU 71 ⁽²⁾	47°05'35" N	4°05'10" E	650	1 496	Autun (20, NW)
F.D. de Château-Regnault	EPC 08	49°56'51" N	4°48'35" E	480	1 389	Dinant (32, SSW); Charleville (18, N)
F.S. de Manson	EPC 63 ⁽³⁾	45°45'20" N	2°57'58" E	950	1 153	Clermont-Ferrand (8, W)
F.D. de Voirons	EPC 74	46°13'42" N	6°20'58" E	1 200	1 389	Genève (10, E); Thonon-les-Bains (20, SW)
F.S. de Monteil	EPC 87	45°48'00" N	1°48'55" E	650	1 569	Limoges (44, E)
F.D. de l'Aigoual	HET 30	44°06'55" N	3°32'36" E	1 400	2 766	Montpellier (58, NW); Ales (42, W)
F.D. de Hauts-Bois	HET 54	48°30'35" N	6°42'23" E	325	925	Epinal (40, NE); Lunéville (18, SE); Nancy (38, SE)
F.C. d'Ance	HET 64	43°09'01" N	0°39'29" W	400	1 378	Pau (28, SW)
F.D. d'Aitone	PL 20 ⁽⁴⁾	42°15'56" N	8°50'49" E	1 100	1 556	Calvi (34, SE); Porto (12, E); Ajaccio (30, N)
F.D. d'Oléron	PM 17	45°58'59" N	1°16'25" W	15	821	La Rochelle (20, S); Rochefort (28, W)
F.C. de Losse	PM 40	44°02'46" N	0°00'02" W	150	983	Agen (52, SW); Mont-de-Marsan (44, NE)
F.D. de Bercé	PM 72	47°44'53" N	0°20'04" E	153	802	Le Mans (26, SE); Tours (46, NW)
F.D. des Pays-de-Monts	PM 85	46°52'37" N	2°08'18" W	5	776	Nantes (56, SW); St. Nazaire (40, S)
F.D. du Gavre	PS 44	47°32'24" N	1°48'05" W	38	912	Nantes (34, NW); St. Nazaire (38, NE)
F. Indivise d'Haguenau	PS 67	48°51'01" N	7°42'39" E	175	803	Strasbourg (24, N); Haguenau (6, NW); Karlsruhe (50, SW)
F.D. de Brotonne	PS 76	49°27'14" N	0°44'53" E	70	923	Le Havre (40, E); Rouen (20, W)
F.D. de Boscodon	SP 05	44°29'25" N	6°27'33" E	1 360	1 007	Gap (28, E)
F.D. de Callong-Mirailles	SP 11	42°52'02" N	2°06'04" E	950	1 139	Foix (40, E); Carcassonne (40, SW)
F.D. de Ban	SP 25	46°58'34" N	6°27'42" E	1 000	1 601	Pontarlier (10, NW); Besançon (40, SE)
F.D. de Saint-Hugon	SP 38	45°25'17" N	6°07'53" E	1 100	1 449	Chambéry (24, SE); Annecy (54, S); Grenoble (34, NE)
F.D. d'Abreschviller	SP 57	48°36'36" N	7°08'02" E	400	1 349	Strasbourg (48, W); Nancy (68, E)
F.D. de Guebwiller	SP 68	47°56'01" N	7°07'31" E	680	1 385	Colmar (12, SSW); Mulhouse (28, NW)

F.D. = forêt domaniale ; F.C. = forêt communale ; F.S. = forêt sectionale ;

1. Mesures de dépôts *stricto sensu* depuis 1995 seulement ; 2. Mesures de dépôts *stricto sensu* depuis 1996 seulement ;

3. Manque de mesures de dépôts *stricto sensu* en 1995 et 1998 ; 4. Mesures de dépôts *stricto sensu* depuis 1994.

Tableau 4 : Localisation des stations de mesure du sous-réseau CATAENAT. Les mesures ont été réalisées en continu dans ces sites de 1993 à 1998. Les sites indiqués en italique mesurent aussi bien les dépôts totaux que les dépôts humides *stricto sensu*.

Table 4: Location of the measuring stations belonging to the sub-network CATAENAT. The measurements were carried out continuously from 1993 to 1998. Sites indicated in italics measure both bulk and wet-only precipitation.



3.3

Méthodes d'échantillonnage et d'analyse des précipitations

3.3.1 Méthodes d'échantillonnage des retombées humides *stricto sensu* dans les réseaux MERA et CATAENAT

Les précipitations, sous forme de pluie ou de neige, sont prélevées à l'aide d'un collecteur à commande d'ouverture automatique. C'est un système qui permet, dès l'apparition de quelques gouttes de pluie ou encore de flocons, de déclencher l'ouverture du couvercle du collecteur. Le couvercle se referme lorsque le détecteur est à nouveau sec. L'eau provenant des précipitations est ensuite soit recueillie directement dans un récipient en polyéthylène (réseau CATAENAT, voir photos page 20), soit canalisée par un cône de réception dans des flacons également en polyéthylène (réseau MERA, voir photos page 16).

Chaque station est dotée, de plus, d'un pluviomètre permettant de connaître exactement le volume d'eau tombé sur le site d'échantillonnage. Ce paramètre est en effet indispensable pour le calcul des dépôts atmosphériques.

La périodicité d'échantillonnage est différente dans les deux réseaux. L'étude du transport des polluants et la recherche des sources d'émissions potentielles nécessitent, pour le réseau MERA, de réaliser des prélèvements journaliers. C'est ainsi que tous les jours, à 9h TU, une vanne de distribution opère un changement de flacons au sein du collecteur. Un opérateur vient relever chaque semaine l'ensemble des flacons qui ont ainsi été successivement exposés durant sept jours, pour les remplacer systématiquement par des flacons neufs. Tous les flacons, remplis ou non, sont ensuite identifiés, annotés et expédiés rapidement dans des caisses spéciales vers le laboratoire d'analyse.

Pour le réseau CATAENAT, l'échantillonnage est hebdomadaire, c'est à dire que chaque flacon reste exposé pendant une semaine à l'issue de laquelle il est relevé et conservé à une température inférieure à 4 °C. L'envoi des flacons au laboratoire d'analyse s'effectue toutes

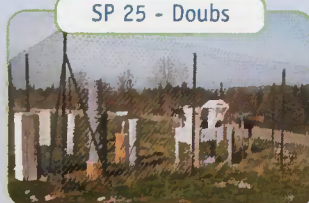
EPC 63 - Puy-de-Dôme



PL 20 - Aïtone, Corse



SP 25 - Doubs



La Ha



Échantillonnage



Réseau MERA



**Transmission
des échantillons**
aux laboratoires
Wolff Environnement



Réseau CATAENAT

**Acheminement des échantillons
vers le laboratoire et analyse chimique**

s deux réseaux



Iraty



Le Casset



Morvan



Analyses des échantillons de précipitation

Stockage des échantillons



Analyse chimique



Préparation des échantillons pour analyse



Intégration des données dans les bases de données

Menu Fichier Paramètres Données Analyse Aide

Système LAMAT NAT - Task support

Affichage : certifiés et non certifiés ou référence, durée, durée des totaux

Code : C101-00 Période : 77

Période d'échantillonnage		Période d'analyse		Cot. auto		Période d'analyse		Total des totaux	
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994
2	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994
3	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994
4	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994	01/01/1994

Code : C101-00 Période : 77

Accueil

Système LAMAT NAT - Task support

les quatre semaines. Les analyses chimiques sont réalisées sur un échantillon mensuel constitué du mélange, proportionnel à la pluviosité de chaque semaine, des quatre échantillons hebdomadaires.

Un programme d'assurance qualité décrivant chacune des opérations a été mis en place dans les réseaux. Il concerne l'ensemble de la chaîne de mesures, du prélèvement des échantillons à la validation et la diffusion des données. Un manuel d'échantillonnage relatif aux opérations de terrain est mis à disposition des opérateurs de site. Par ailleurs, des fiches de renseignements sont remplies chaque semaine par l'opérateur dans le but de connaître avec précision le déroulement de l'échantillonnage. Enfin, des contrôles sont effectués régulièrement afin de s'assurer de la qualité de la chaîne de prélèvement : en utilisant notamment des échantillons témoins, mais aussi en visitant fréquemment les sites de mesures pour s'assurer de l'état de la station et du matériel. La durée de la période de transport est également surveillée.

3.3.2 Méthodes d'échantillonnage des retombées totales dans le réseau CATAENAT

L'échantillonnage des précipitations totales est réalisé à l'aide de deux jauges d'Owen [10]. En hiver et dans les stations à enneigement fréquent, l'échantillonnage pour analyse est fait à l'aide de deux grands bacs à l'intérieur desquels sont placés des sacs en polyéthylène. L'échantillonnage se fait une fois par semaine. Les échantillons sont gardés dans un réfrigérateur (maximum à 4 °C), jusqu'à leur envoi toutes les quatre semaines au laboratoire d'analyse. Les analyses chimiques sont réalisées sur un échantillon mensuel, résultat d'un mélange des échantillons hebdomadaires, en fonction de la proportion de la pluviosité hebdomadaire par rapport à la pluviosité de ces quatre semaines (13 périodes de 4 semaines constituent un « an » de 52 semaines, soit 364 jours, sauf en 1995 où l'on a échantillonné durant 53 semaines afin de rattraper les jours manquants des années précédentes).

La pluviosité est mesurée à l'aide d'un pluviomètre [12] à lecture manuelle directe (standard de Météo France, Cahier des spécifications techniques, 1980), associé dans la plupart des sites à un pluviomètre automatique faisant partie d'une station météorologique indépendante. En hiver et dans les sites de montagne à enneigement important, deux totalisateurs [17] sont utilisés.

Les années de mesure, dont les résultats sont présentés ci-après, sont définies comme suit :

1993 : 30/12/1992 - 29/12/1993

1994 : 29/12/1993 - 28/12/1994

1995 : 28/12/1994 - 03/01/1996

1996 : 03/01/1996 - 01/01/1997

1997 : 01/01/1997 - 31/12/1997

1998 : 31/12/1997 - 30/12/1998

Dans le programme assurance qualité de CATAENAT, qui concerne l'ensemble des opérations, on peut distinguer cinq niveaux :

1. méthodes d'échantillonnage appliquées ;
2. travaux réguliers sur le terrain (voir Ulrich et Lanier, 1993) ;
3. transport des échantillons ;
4. traitement des échantillons, analyse au laboratoire et transmission des données ;
5. utilisation des données lors de calculs et interprétation de ces données.

Dans chacun de ces niveaux, on essaye d'identifier les erreurs possibles et leur seuil d'acceptabilité pour la validation finale des résultats obtenus.

3.3.3 Transport des échantillons et analyses chimiques

Le groupe des laboratoires Wolff-Environnement (Évry) est chargé de la gestion et de la coordination du transport des caisses d'échantillons pour les deux réseaux. Chaque caisse est parfaitement identifiée par le code de la station et un numéro ou un code couleur. C'est au total trois ou quatre caisses qui sont affectées à chaque station dans le but d'assurer la rotation entre le laboratoire d'analyses et le site de mesures. En moyenne et suivant l'éloignement du site, le transport des échantillons pour arriver au laboratoire d'analyses met entre un et trois jours.

Le Service de l'Air des laboratoires Wolff-Environnement (Groupe SGS) est chargé de l'ensemble des analyses physico-chimiques des eaux de pluie des deux réseaux MERA et CATAENAT. Un plan d'assurance qualité nommé PAQ PLACID (Plan d'Assurance de la Qualité - PLuies ACIDes) a été établi et complété par des procédures spécifiques à chaque réseau. Ce PAQ a été établi en se basant sur la norme NF EN 45001 et s'applique aux étapes suivantes :

- mouvements des échantillons et du matériel ;
- réception et enregistrement des échantillons ;
- réalisation des analyses physico-chimiques : procédures de contrôle et de validation ;
- édition et envoi de rapport d'analyses ;
- archivage des données et élimination des échantillons.

L'objectif de ce PAQ est de permettre la production de données de qualité et de fournir les moyens d'identifier d'éventuelles erreurs analytiques.

Outre les contrôles analytiques réalisés spécifiquement pour les deux réseaux MERA et CATAENAT (échantillons partagés, blancs d'analyses, blancs d'échantillonnage, ...), le laboratoire d'analyses participe annuellement à des campagnes d'essais interlaboratoires organisées au niveau international. Ces campagnes permettent d'évaluer les performances des laboratoires participants et de recenser, le cas échéant, des améliorations à apporter.

Du point de vue des résultats, les laboratoires d'analyses Wolff-Environnement n'ont cessé d'améliorer la qualité de leurs analyses et se placent parmi les laboratoires européens de bon niveau pour ce qui concerne l'analyse des principaux ions contenus à l'état de traces dans les eaux de précipitation.

Les résultats d'analyse sont transmis aux responsables des réseaux au plus tard dans le mois qui suit le dernier prélèvement. Un système de contrôle et de validation des données commun aux deux réseaux a été mis en place en se calquant sur les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM).

Les paramètres chimiques mesurés par le laboratoire d'analyses sont décrits dans le tableau 5 qui indique également les techniques d'analyse utilisées, la norme ou la référence s'y afférant ainsi que la limite de détection analytique.

Paramètre chimique	Mode d'analyse	Méthode analytique	Limite de détection (mg/L)
pH	Électrométrie	NFT 90008	
Conductivité	-	NFT 90031	1 μ S
K ⁺ , Mg ²⁺	CI ⁽¹⁾ , ICP ⁽²⁾ Plasma, AAS ⁽³⁾	ISO/CD 10304-5	0,02
	flamme	ISO/DIS 14911-1	
Ca ²⁺ , Na ⁺	CI, ICP Plasma, AAS	ISO/CD 10304-5	0,03
	flamme	ISO/DIS 14911-1	
N-NH ₄ ⁺	Spectrométrie, CI	ISO/CD 10304-5 et NFT 90015	0,03
N-NO ₃ ⁻	CI	NF EN ISO 10304-1	0,02
Cl ⁻	CI	NF EN ISO 10304-1	0,03
S-SO ₄ ²⁻	CI	NF EN ISO 10304-1	0,02
Alcalinité/Acidité ⁽⁴⁾	Titration manuelle/automatique	OMM n° 229	-

1. Chromatographie ionique (CI).
2. Plasma couplé par induction (Inducted Coupled Plasma, ICP).
3. Spectrométrie d'absorption atomique (Atomic Absorption Spectrometry, AAS).
4. Analysée seulement dans le réseau CATAENAT.

Tableau 5 : Méthodes analytiques utilisées de 1993 à 1998 pour l'analyse des eaux de pluie par le Service de l'Air des laboratoires WOLFF-Environnement.

Table 5: Analytical methods used for rainwater analysis by the Laboratoires WOLFF-Environnement, Service de l'Air, from 1993 to 1998.

4

Évolution
des concentrations
et dépôts
de 1993 à 1998



4

Évolution des concentrations et dépôts de 1993 à 1998

4.1 Évolution des concentrations moyennes annuelles

4.1.1 Retombées humides (*stricto sensu*)

Les résultats correspondant aux mesures réalisées dans les 18 sites des réseaux MERA et CATAENAT, équipés pour la mesure des dépôts *stricto sensu*, sont présentés dans le tableau 6 pour la période 1993-1998. Il comporte la moyenne des concentrations annuelles pondérées par la pluviosité [4], l'écart type, le coefficient de variation de l'écart type par rapport à la moyenne (%), la médiane et les valeurs minimales et maximales des concentrations moyennes annuelles relevées pour cette période. Les chiffres présentés dans ce tableau indiquent le niveau de concentration des espèces majeures présentes dans les eaux de pluie non perturbées par des influences polluantes locales urbaines et/ou industrielles. Ils représentent le niveau atmosphérique de fond sur le territoire français.

Indicateur de l'évolution de l'acidité directe

Une précipitation est considérée généralement comme acide si son pH [13] est inférieur à la valeur de 5,6 correspondant à l'équilibre de l'eau pure avec le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique. Certains auteurs, qui prennent également en compte des émissions polluantes d'origine naturelle, considèrent qu'une précipitation est acide si son pH est inférieur ou égal à 5.

La valeur moyenne de 5,04 pour le pH (tableau 6) met donc en évidence le caractère globalement acide des précipitations entre 1993 et 1998 en France. Durant cette période, deux sites du quart Nord-Est (Donon, Revin), exposés à l'influence des sources provenant de l'Europe de l'Est et des pays du Nord-Ouest de l'Europe, présentent cinq valeurs annuelles sur six avec un pH inférieur à 5 (annexe 12). Deux sites sous l'influence des embruns marins

(Brotonne et La Hague) possèdent trois valeurs de pH sur six inférieures à 5. Les autres sites, plus exposés aux flux océaniques ou au régime de montagne, ne présentent que peu (0 ou 1) de moyennes annuelles inférieures à 5. Les moyennes par année, également présentées dans le tableau 6, mettent en évidence le caractère particulièrement acide de l'année 1996 avec une moyenne annuelle du pH de 4,86 tous sites confondus (minimum de 4,61 à Revin et 4,65 au Donon).

Retombées humides	pH	Cl mg/L	S-SO ₄ mg/L	N-NO ₃ mg/L	Na mg/L	N-NH ₄ mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L
Moyenne	5,04	1,57	0,47	0,27	0,86	0,47	0,08	0,14	0,37
Écart type	0,22	2,60	0,16	0,07	1,43	0,21	0,08	0,19	0,18
CV (%) ⁽¹⁾	4	165	34	27	166	44	104	134	49
Médiane ⁽²⁾	5,06	0,79	0,46	0,26	0,42	0,42	0,07	0,10	0,33
Minimum	4,61	0,15	0,24	0,16	0,07	0,13	0,04	0,01	0,13
Maximum	5,65	13	1,03	0,50	7,44	1,00	0,51	1,06	0,85
1993	5,14	1,26	0,54	0,29	0,71	0,69	0,08	0,12	0,40
1994	5,16	1,74	0,49	0,26	1,02	0,57	0,09	0,19	0,49
1995	5,04	1,77	0,48	0,28	0,97	0,50	0,08	0,16	0,30
1996	4,86	1,51	0,48	0,30	0,88	0,38	0,08	0,13	0,37
1997	5,06	1,49	0,39	0,22	0,67	0,30	0,07	0,12	0,30
1998	5,05	1,72	0,42	0,25	0,98	0,35	0,06	0,13	0,31

1. Le CV (coefficient de variation) est l'écart type exprimé en % de la moyenne.

2. Valeur centrale séparant les données en deux parties égales (50 % au-dessus et 50 % au-dessous).

Tableau 6 : Statistiques globales calculées pour les 18 sites MERA et CATAENAT de mesures des retombées humides pour la période 1993-1998 et basées sur les concentrations moyennes pondérées des espèces majeures mesurées dans les retombées humides (*stricto sensu*).

Table 6: General statistics for wet-only precipitation measured from 1993 to 1998 in 18 MERA or CATAENAT sites. Data are based on annual mean weighted concentrations of the major ions.

Le tableau 6 met également en évidence des concentrations plus élevées en chlorures et sodium par rapport aux autres espèces, caractérisant ainsi un climat de type océanique. Il faut néanmoins préciser que le nombre de sites soumis à ce régime océanique est important et peut fausser la tendance. En effet, comme on peut s'en apercevoir sur la figure 1 d'implantation des sites, il existe peu de points de mesures en région montagneuse et dans la région du Sud-Est de la France, soumises plutôt à un climat respectivement de montagne et méditerranéen. Les concentrations moyennes en sulfates et nitrates, éléments majeurs

qui contribuent à l'acidité des précipitations par association avec les ions H^+ en formant les acides sulfurique (H_2SO_4) et nitrique (HNO_3), sont plutôt faibles, respectivement 0,47 mg S/L pour le soufre et 0,27 mg N/L pour l'azote. Enfin, la concentration en ammonium, élément à associer à l'ammoniac gazeux (NH_3) qui neutralise les acides sulfurique et nitrique pour former des aérosols neutres, est de 0,47 mg/L en azote avec des fluctuations inter-annuelles assez importantes.

À l'exception des espèces caractérisant les apports marins (chlorures et sodium) et de l'ammonium, les autres espèces ne présentent pas de variabilité spatiale et temporelle bien marquée sur les six ans de mesures, contrairement au SO_4 , par exemple sur les sites du Nord-Est (Probst *et al.*, 1995 a). Les réseaux MERA et CATAENAT donnent des résultats concordant sur cette période. Il faut noter la diminution de près de 50 % des teneurs en ammonium entre 1993 et 1998, alors que la réduction moyenne en Europe des émissions d'ammoniac n'est que de 15 % sur la période 1990-1995 (Berge, 1997).

L'ensemble des résultats par station et par année est présenté graphiquement sur les figures 2a, 3a, 4a, 5a et 6a, mais également sous forme de tableaux en annexes. Il apparaît clairement qu'il existe une variabilité spatiale pour certains éléments et notamment pour les ions H^+ (pH). Les régions situées dans le quart Nord-Est du territoire sont beaucoup plus exposées aux événements acides (Dambrine *et al.*, 1998 ; Massabuau *et al.*, 1995). Les régions de l'extrême Est sont principalement soumises à des flux continentaux – ou plutôt semi-continentaux car l'influence océanique n'est pas totalement éliminée – et par conséquent peuvent être exposées aux fortes émissions polluantes émanant des pays de l'Est de l'Europe. L'urbanisation importante et les activités industrielles dans les pays situés plus au nord (Royaume-Uni, Allemagne, ...) sont également à l'origine de cette acidité des précipitations.

Les sites représentatifs d'une région présentant une forte acidité (figure 2a) sont les suivants : Nord-Pas-de-Calais (CHP 59) avec des valeurs de pH oscillant sur la période 1995-1998 entre 4,7 et 4,9 ; Alsace (Donon) dont les variations annuelles s'étendent de 4,7 à 5 et enfin Champagne-Ardenne (Revin) dont les valeurs de pH varient de 4,6 à 5,1. Ces sites sont directement exposés aux passages de masses d'air influencées par de fortes émissions anthropiques industrielles ou urbaines. D'autres sites en Haute et Basse-Normandie (Brotonne et La Hague), ainsi qu'en Aquitaine (PM 40c) présentent également, à un degré moindre, un caractère acide. L'origine de leurs précipitations est plutôt liée fortement aux embruns marins (Fillion *et al.*, 1999 a,b).

Les autres stations de mesures présentent un caractère acide moins marqué, les valeurs de pH oscillant entre 5 et 5,4. À noter tout de même, les résultats de l'année 1996 où la faible pluviométrie, enregistrée sur la quasi-totalité des sites, a occasionné une forte

augmentation de l'acidité (diminution de pH). Ceci peut s'expliquer par le fait que les précipitations moins nombreuses ont entraîné les polluants acidifiants accumulés pendant des périodes plus longues dans l'atmosphère, contribuant ainsi à augmenter l'acidité. Seule exception à cette caractéristique, le site de Corse (PL 20) où la pluviométrie atteint 1 963 mm, c'est-à-dire une valeur largement supérieure à celles des autres années (1 400 - 1 500 mm).

Indicateurs de l'évolution des composés acidifiants

Les concentrations en soufre varient suivant les sites de 0,3 à 1 mg/L pour les sulfates (figure 3a) et de 0,2 à 0,5 mg/L en azote pour les nitrates (figure 4a). Une partie de ces sulfates provient des embruns marins et en conséquence les concentrations décroissent lorsque l'on s'éloigne des côtes. Les niveaux de concentrations de ces espèces acidifiantes sont généralement associés à des valeurs de pH faibles et donc acides. Si, en revanche, on s'intéresse aux variations spatiales des sulfates non marins sur le territoire français, il apparaît que les maxima se situent également dans les régions du quart Nord-Est de la France.

On peut considérer l'ammonium comme l'indicateur de la pollution « agricole » : l'élevage intensif de bovins, de porcs et de volailles, ainsi qu'une fertilisation intensive en nitrate d'ammonium provoque l'émanation du gaz ammoniac, qui se retrouve sous forme d'ion ammonium dans l'eau de pluie. Cette espèce se retrouve souvent associée aux nitrates et sulfates sous forme d'aérosols. Les variations de concentrations moyennes annuelles, relevées en chacun des sites sont assez importantes, de 0,2 à 1 mg/L en azote. Les émissions d'ammoniac étant réparties sur l'ensemble du territoire français, il n'apparaît pas de réelles disparités géographiques. En comparant les données des tableaux figurant en annexe 1, on observe une diminution assez importante des concentrations moyennes annuelles d'ammonium entre 1993 et 1998 (figure 4a). Cette baisse des concentrations de près de 50 % pour une bonne majorité des sites de mesures concerne essentiellement les sites du réseau MERA et dans une moindre mesure ceux du réseau CATAENAT. L'implantation des sites CATAENAT au sein de clairières, non exposés aux flux directs des masses d'air pourrait expliquer cette différence.

Indicateurs de l'évolution d'éléments d'origine marine et terrestre

Parmi ces indicateurs on compte le sodium et les chlorures (figure 5a) pour la caractérisation des embruns marins, et le calcium (figure 6a), le magnésium et le potassium (non représentés car présentant des valeurs très faibles) pour les éléments d'origine terrestre. Ces dernières espèces présentent des concentrations assez variables dans le temps et dans l'espace. Elles sont directement influencées par des phénomènes d'érosion éolienne ou même de transport de poussières sahariennes, phénomènes fréquents sur notre territoire.

Les teneurs annuelles en chlorures et sodium fluctuent suivant l'éloignement du site à la zone côtière. Elles sont supérieures à 10 mg/L et 5 mg/L en chlorures à La Hague et en Corse respectivement, et supérieures à 5 mg/L et 2 mg/L de sodium pour ces mêmes sites ; pour les autres sites elles se situent entre 0,1 et 1 mg/L. Les concentrations en potassium sont très faibles, variant de 0,04 à 0,5 mg/L en moyenne annuelle, tandis que celles de magnésium varient de 0,01 à 1 mg/L (annexe 1). Les concentrations les plus élevées de potassium et de magnésium ont été enregistrées sur le site de La Hague. Enfin, les teneurs en calcium (figure 6a), élément prépondérant de cette famille de composés d'origines terrestre et marine fluctuent entre 0,2 et 0,9 mg/L.

4.1.2 Retombées totales

Les caractéristiques générales des précipitations totales, tous sites confondus, sont présentées dans le tableau 7. Généralement, en France, les précipitations totales sont également acides avec un pH situé entre 4,7 et 6,1. La fréquence du nombre de valeurs de pH inférieurs à 5,5 fluctue de 53 % à 74 % suivant les années.

La variabilité des concentrations observée d'un site à l'autre et d'une année à l'autre est très forte pour la plupart des ions, car 68 % des valeurs oscillent entre 27 % et 90 % de la moyenne nationale sur six ans (voir les valeurs des coefficients de variation (CV) dans le tableau 7).

Considérées individuellement, les concentrations moyennes présentent une grande disparité selon la localisation géographique du site et l'ion concerné. L'ensemble des résultats par espèce ionique et par année est présenté dans les tableaux en annexe 2 et interprété ci-après.

Indicateur de l'évolution de l'acidité directe

Six des 27 sites représentés sur la figure 2b présentent une valeur moyenne annuelle de pH acide (cinq années sur six avec un pH moyen inférieur à cinq). Dans trois cas, en Haute-Normandie (PS 76), dans les Ardennes (EPC 08) et en Alsace (PS 67a), on attribue cette acidité à la forte industrialisation régionale. Dans les trois autres cas, sur l'Ile d'Oléron (PM 17), dans le Sud des Landes (CHP 40) et dans le Sud des Cévennes (HET 30), on ne peut que supposer un transport à moyenne ou longue distance de polluants acidifiants. Les sites avec les pH les moins acides (> 5,5 au moins trois années sur six) sont situés dans le Massif Central (EPC 63), en Vendée (PM 85) et dans les Hautes-Alpes (SP 05). Ce dernier site montre même cinq années sur six des pH > 5,5 (maximum : 6,1). Il peut donc être considéré comme le site le moins pollué par l'acidité directe.

Retombées totales	pH	Cl mg/L	S-SO ₄ mg/L	N-NO ₃ mg/L	Na mg/L	N-NH ₄ mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L
Moyenne	5,09	2,03	0,59	0,30	1,17	0,45	0,15	0,16	0,54
Écart type ⁽¹⁾	0,31	0,77	0,17	0,08	0,46	0,15	0,07	0,06	0,48
CV (%) ⁽²⁾	6	38	30	27	39	33	44	35	90
Médiane ⁽³⁾	5,06	1,04	0,57	0,28	0,58	0,42	0,14	0,09	0,45
Minimum	4,65	0,18	0,29	0,18	0,09	0,08	0,02	0,00	0,12
Maximum	6,13	13,04	1,19	0,59	7,50	1,12	0,50	1,15	2,74
1993	5,00	1,86	0,71	0,33	1,09	0,58	0,14	0,16	0,70
1994	5,03	1,71	0,57	0,27	1,04	0,38	0,15	0,15	0,56
1995	4,97	1,84	0,57	0,30	1,02	0,44	0,15	0,14	0,45
1996	4,92	1,74	0,56	0,31	1,02	0,42	0,12	0,13	0,51
1997	5,10	1,55	0,51	0,26	0,88	0,35	0,13	0,12	0,44
1998	5,09	1,96	0,58	0,28	1,13	0,40	0,12	0,17	0,54

1. 68 % des mesures des concentrations moyennes pondérées sont situées dans la gamme de valeurs (moyenne – écart type) à (moyenne + écart type).
2. Le CV (coefficient de variation) est l'écart type exprimé en % de la moyenne.
3. Valeur centrale séparant les données en deux parties égales (50 % au-dessus et 50 % au-dessous).

Tableau 7 : Statistiques globales calculées pour les 27 sites CATAENAT de mesure des retombées totales entre 1993 et 1998 et basées sur les concentrations moyennes pondérées du pH et des cations [2] et anions [1] majeurs.

Table 7: General statistics from the 27 CATAENAT sites concerning annual precipitation weighted mean bulk concentrations in annual precipitation measured from 1993 to 1998 for pH and major cations and anions.

Indicateurs de l'évolution des composés acidifiants

Les concentrations moyennes de sulfate (figure 3b) sont surtout élevées ($\geq 0,8$ mg/L en soufre de SO₄ au moins trois années sur six) dans le Nord (CHP 59), en Haute-Normandie (PS 76), sur l'Île d'Oléron (PM 17) et en Vendée (PM 85). Les deux premiers sites sont soumis à de fortes influences industrielle et marine, tandis que les deux derniers, situés à proximité immédiate de la côte atlantique, se trouvent principalement sous influence marine.

Les concentrations moyennes de sulfate les plus faibles ($\leq 0,4$ mg/L en soufre de SO₄ au moins trois années sur six) sont relevées dans le Jura (SP 25), en Haute-Savoie (EPC 74), dans le Morvan (DOU 71), dans le Limousin (EPC 87), en Isère (SP 38) et dans le Sud des Vosges (SP 68). Dans tous les cas, il s'agit de sites suffisamment éloignés des grandes

agglomérations industrielles ou urbaines d'une part, et des côtes marines d'autre part pour ne pas recevoir directement leurs émissions ou des charges marines importantes.

Parmi tous les ions à l'exception des protons [15], le nitrate (figure 4b) est le seul ion présent dans une gamme très étroite des concentrations moyennes pondérées : la différence entre le minimum et le maximum moyen annuel est de seulement 0,41 mg/L en azote, contre souvent plusieurs mg/L pour les autres ions. Les ions nitrates montrent également une variabilité inter-annuelle faible en concentration. Le caractère très diffus et relativement constant des émissions pourrait expliquer cette stabilité temporelle.

Les concentrations de nitrate les plus fortes ($\geq 0,4$ mg/L en azote de NO_3 au moins trois années sur six) se rencontrent de nouveau dans le Nord (CHP 59), dans les Ardennes (EPC 08), en Alsace (PS 67a), en Lorraine (HET 54a) et dans le Nord des Vosges (SP 57). Tous ces sites sont sous le vent de grandes agglomérations ou régions industrielles, même éloignées. Il s'agit souvent de vents d'Est et de Nord-Est.

De faibles valeurs ($\leq 0,2$ mg/L en azote de NO_3 au moins trois années sur six) ne sont rencontrées que pour un site dans les Hautes-Alpes (SP 05). Celui-ci se trouve à l'abri des principales sources d'émission automobile. Il est de ce fait considéré comme le site le moins pollué du réseau par les nitrates.

L'ammonium (figure 4b) est un autre élément chimique important qui est fortement associé aux émissions d'ammoniac liées aux activités agricoles. Il n'est donc pas étonnant de le trouver à l'état de traces de manière plus accentuée dans les sites situés sous le vent de régions concernées par une agriculture intensive. De fortes concentrations ($\geq 0,6$ mg/L en azote de NH_4 au moins trois années sur six) sont observées dans le Nord (CHP 59), dans les Ardennes (EPC 08, avec une influence probable d'élevages et d'épandage d'engrais du Benelux), en Bretagne (CHS 35), dans le Massif Central (EPC 63), en Lorraine (HET 54a) et en Alsace (PS 67a). Les plus faibles concentrations ($\leq 0,3$ mg/L en azote de NH_4 au moins trois années sur six) sont en revanche observées dans les régions forestières éloignées de ces régions d'émission ou proches de l'Atlantique, ce dernier apportant des masses d'air peu chargées en ammonium : le Sud des Vosges (SP 68), la Haute-Savoie (EPC 74), la Vendée (PM 85), l'Île d'Oléron (PM 17), les Landes (CHP 40), les Hautes-Alpes (SP 05) et l'Isère (SP 38).

Indicateurs de l'évolution d'éléments d'origine marine et terrestre

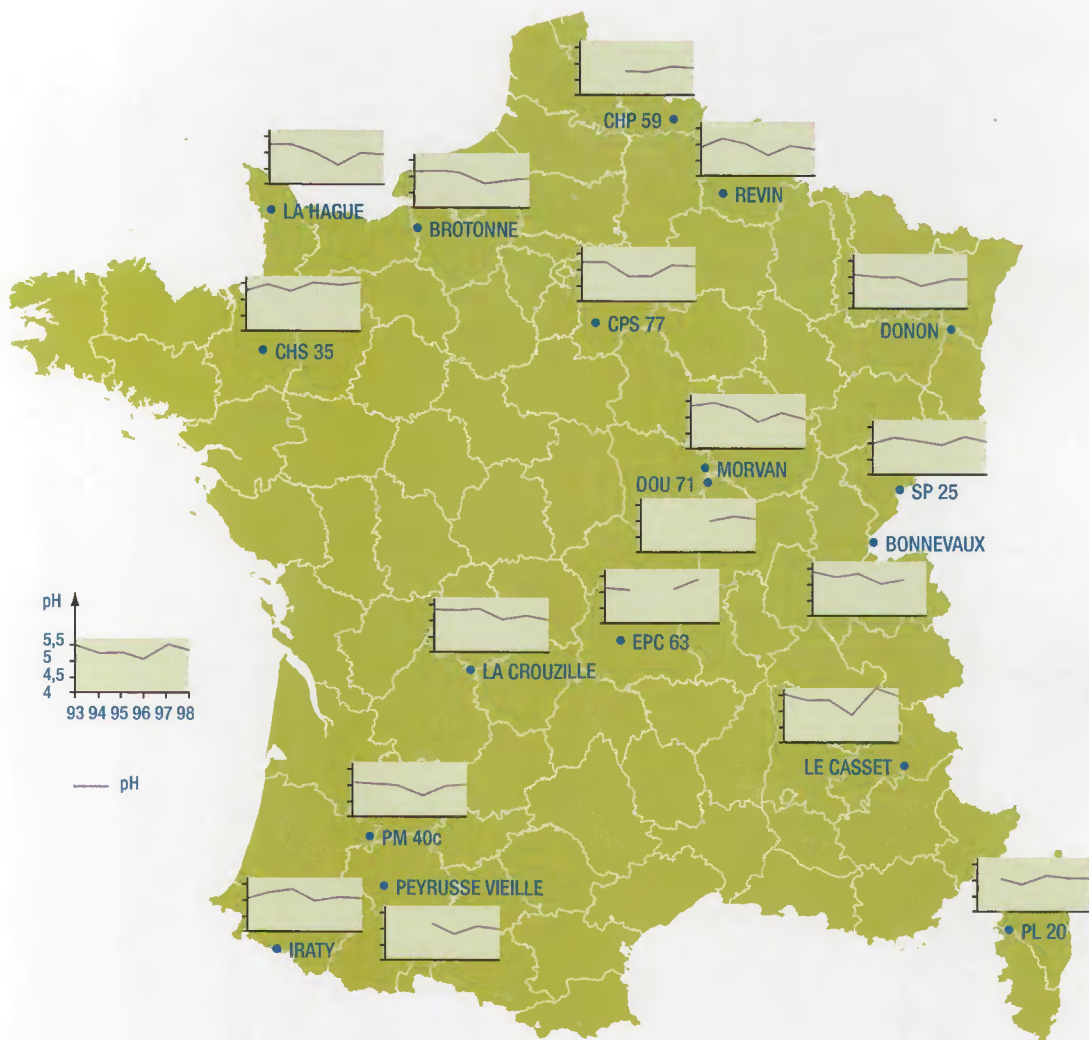
Le site dans les Hautes-Alpes (SP 05) montre une contribution fortement terrestre du calcium (figure 6b), liée probablement à l'érosion des anciennes vallées glacières sur schiste dans la vallée de la Durance. Les autres sites, avec une forte concentration en

calcium ($\geq 0,6$ mg/L au moins trois années sur six), peuvent être classés comme sites marins : l'Ile d'Oléron (PM 17), la Vendée (PM 85) et la Corse (PL 20). Les plus faibles concentrations moyennes ($\leq 0,3$ mg/L au moins trois années sur six) se rencontrent soit à l'Est, donc loin des apports marins (EPC 74, SP 38, SP 57 et SP 68), soit dans le Limousin (EPC 87) qui est suffisamment éloigné de la mer (environ 220 km) pour ne pas être sous son influence directe et qui ne semble pas être influencé par des régions à l'Ouest caractérisées par de fortes érosions de la croûte terrestre.

Dans 16 des 27 sites on observe (annexes) de très faibles concentrations moyennes de magnésium ($\leq 0,1$ mg/L au moins trois années sur six). La concentration augmente au fur et à mesure que l'on s'approche de la côte atlantique, ce qui est tout à fait naturel.

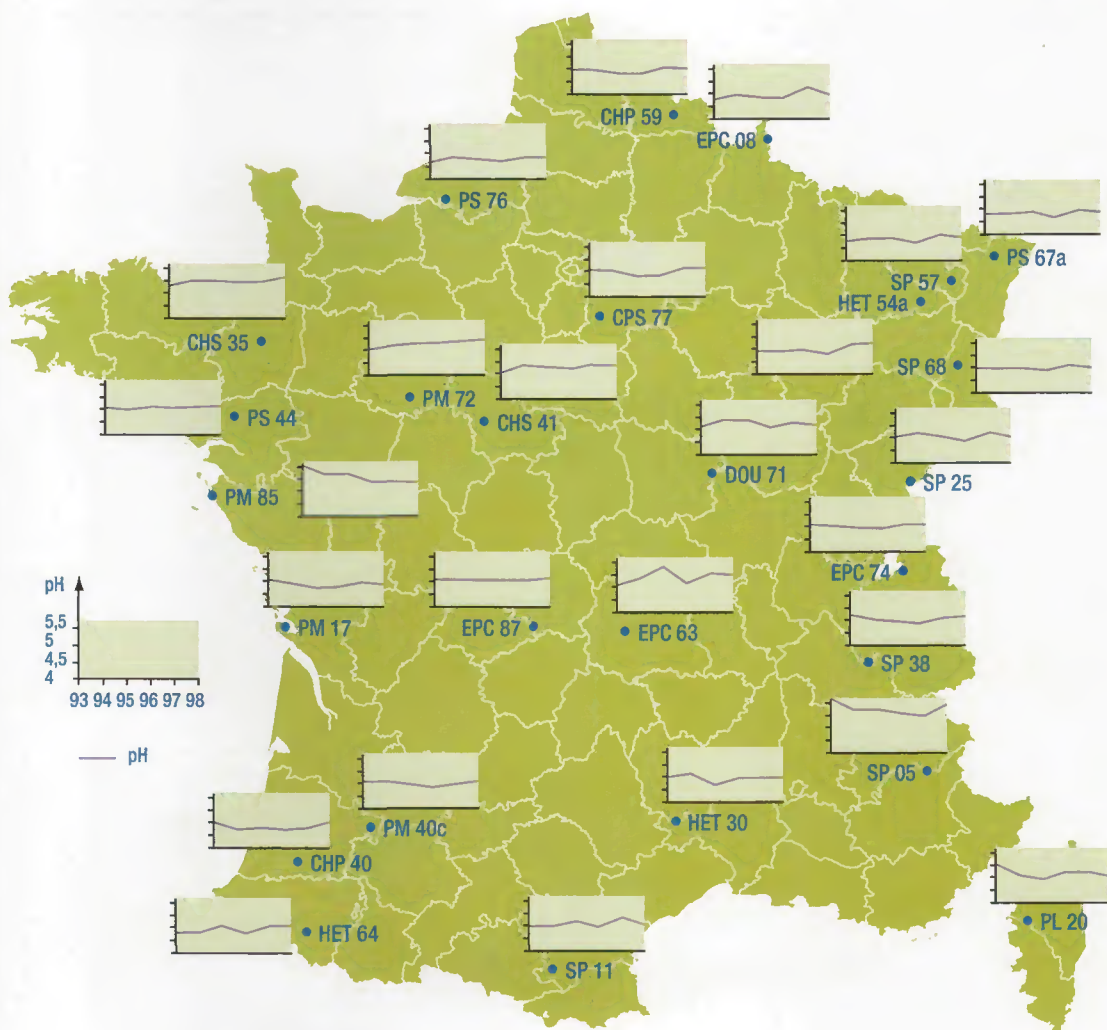
Le potassium est le macro-élément le moins concentré dans les précipitations. Les sites où les plus faibles concentrations ont été mesurées (0,1 mg/L au moins trois années sur six) se trouvent à l'Est, dans le Morvan et les Cévennes, et dans les Pyrénées-Atlantiques (HET 64) où le site semble être à l'abri des grandes entrées atlantiques malgré sa relative proximité de la mer (80 km).

Figure 2 a



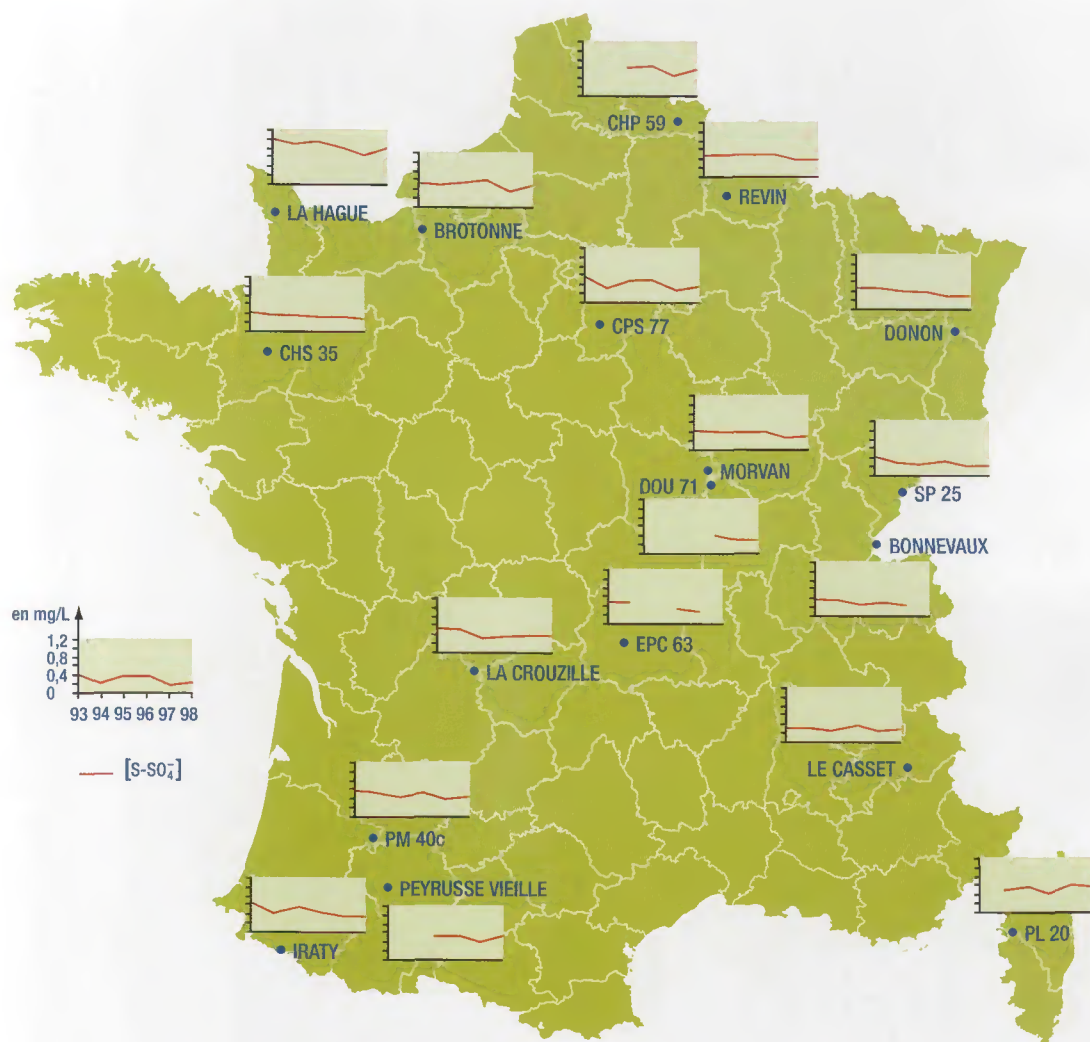
Évolution, de 1993 à 1998, du pH moyen annuel pondéré par la pluviosité **a** dans les retombées humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** dans les retombées totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 2 **b**



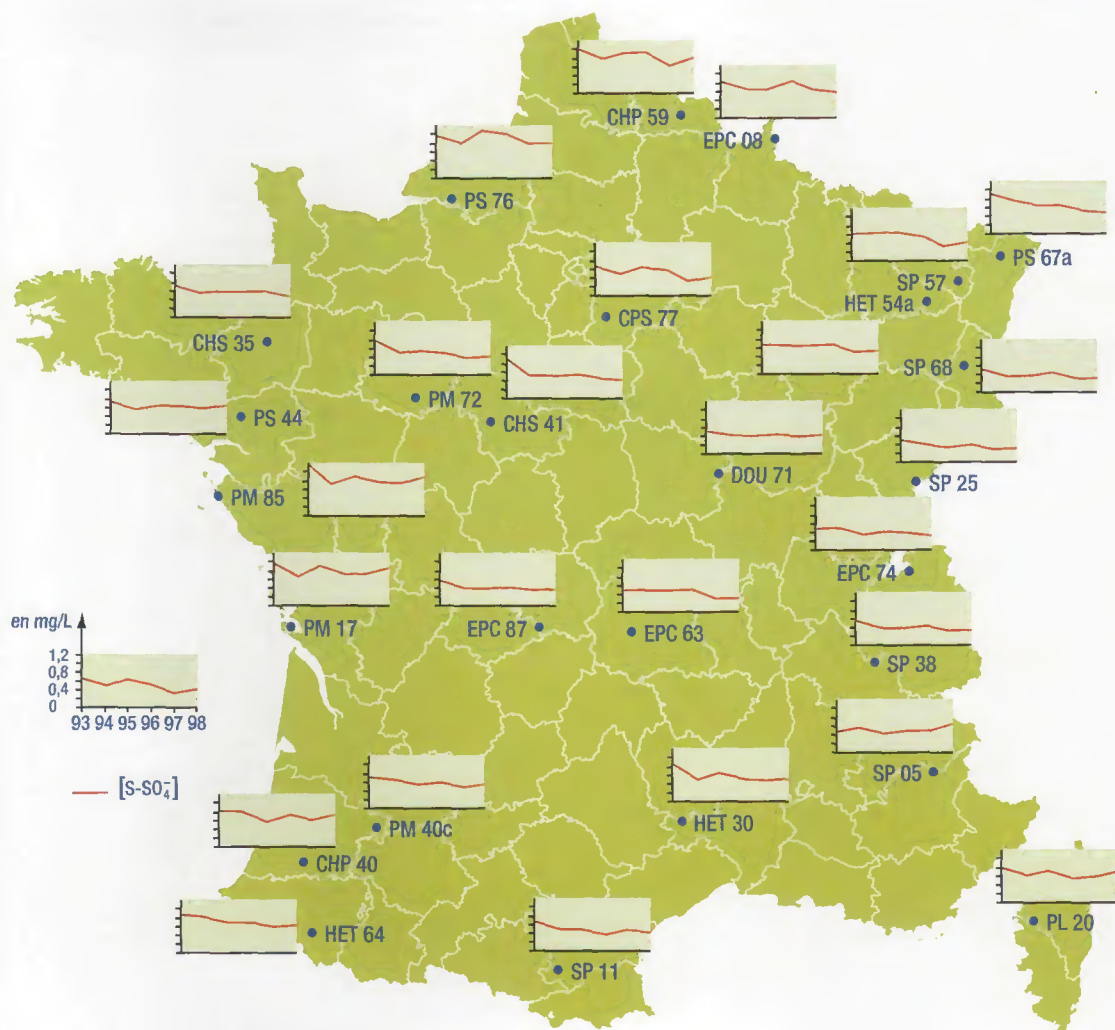
Changes, from 1993 to 1998, in mean annual precipitation weighted pH in **a** wet-
anly (map on the left) and **b** bulk (map on the right) precipitation in the MERA
and CATAENAT networks.

Figure 3 a



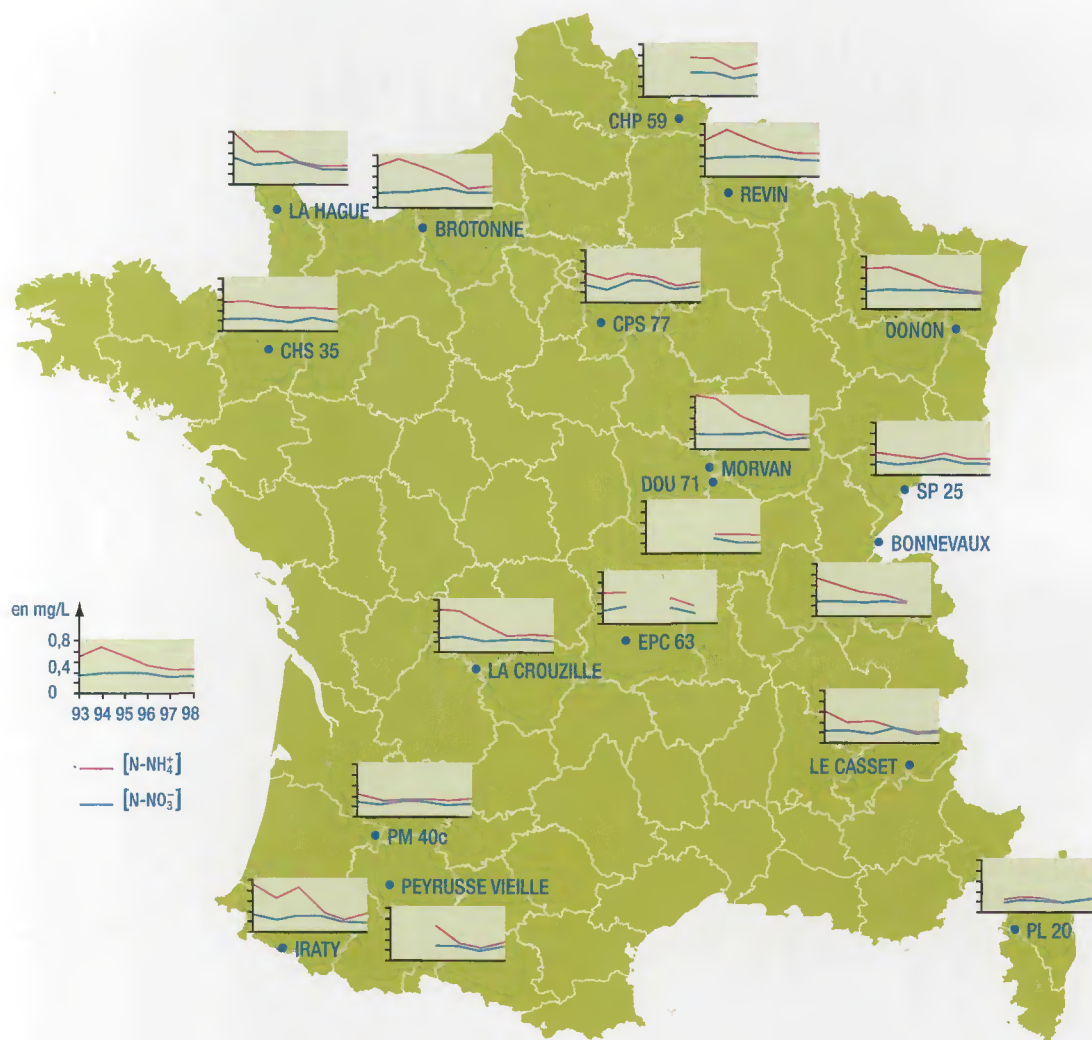
Évolution, de 1993 à 1998, des concentrations moyennes annuelles de sulfate total (S-SO₄) pondérées par la pluviosité **a** dans les retombées humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** dans les retombées totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 3 **b**



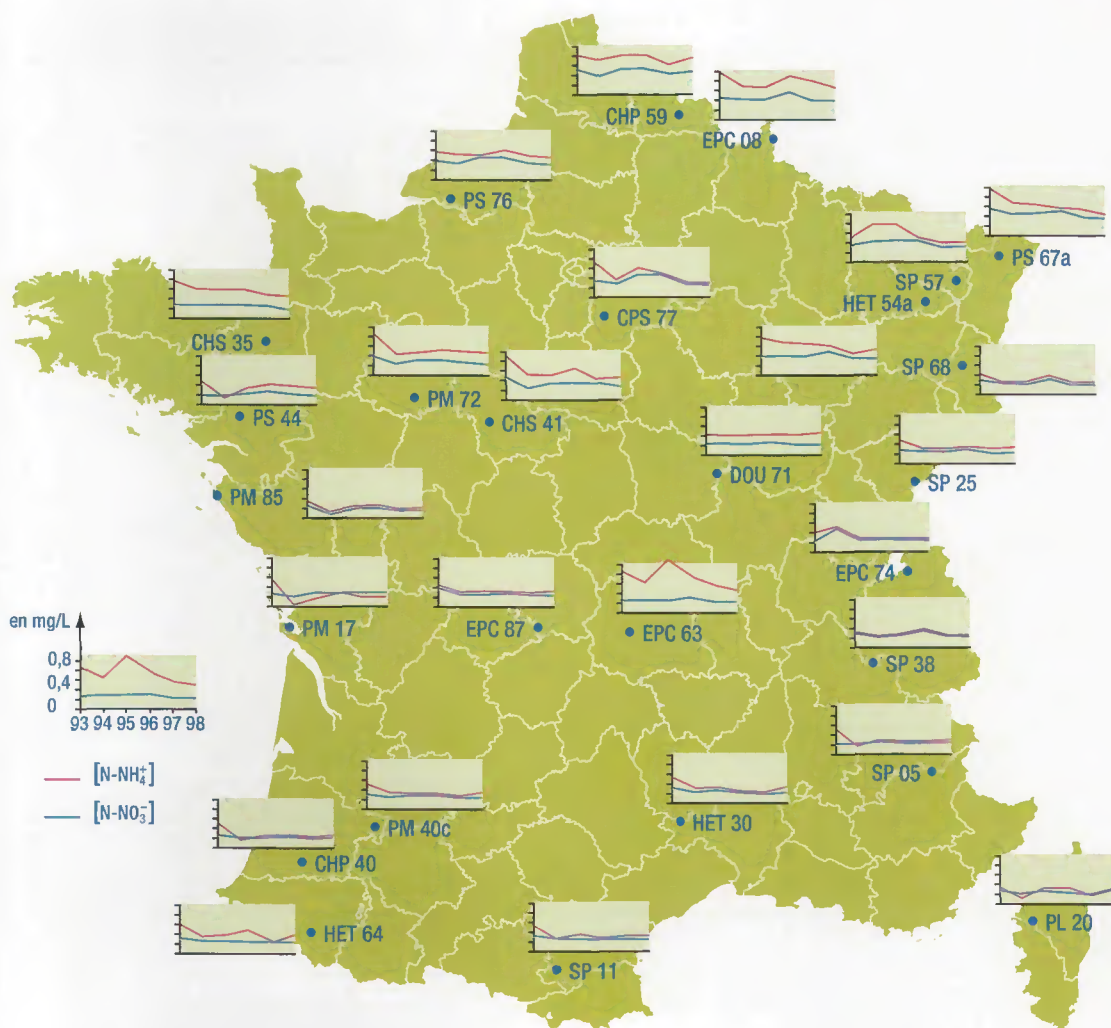
Changes, from 1993 to 1998, in mean annual precipitation weighted sulphate concentrations (S-SO₄) in **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) precipitation in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 4 a



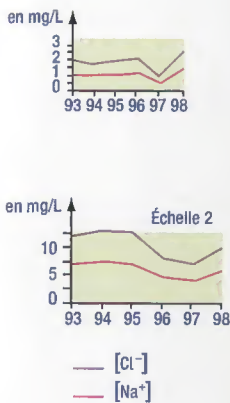
Évolution, de 1993 à 1998, des concentrations moyennes annuelles de nitrate (N-NO₃, en bleu) et d'ammonium (en N-NH₄, en rouge) pondérées par la pluviométrie **a** dans les retombées humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** dans les retombées totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT

Figure 4 **b**



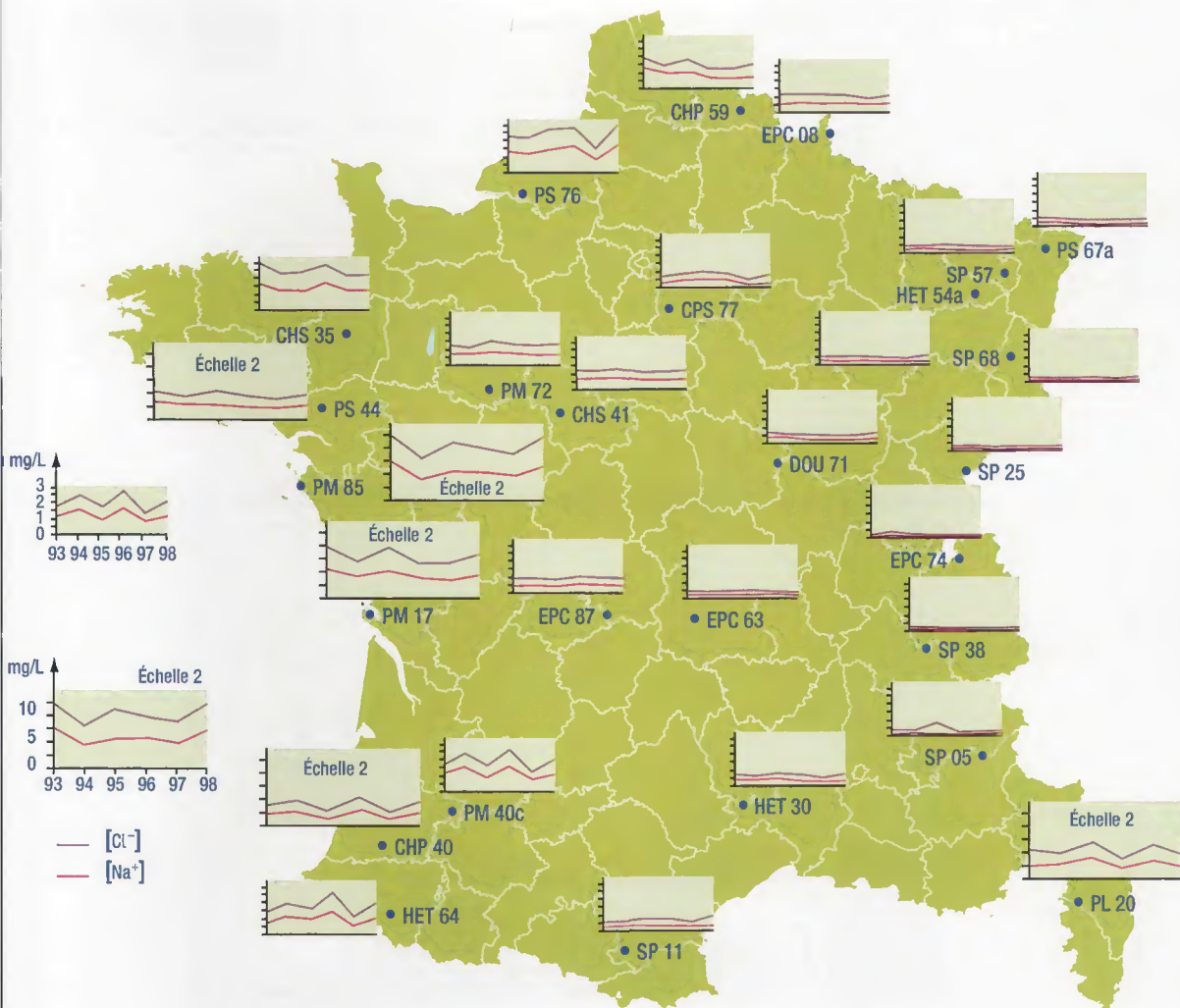
Changes, from 1993 to 1998, in mean annual precipitation weighted nitrate ($N-NO_3$, in blue) and ammonium ($N-NH_4$, in red) concentrations in **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) precipitation in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 5 a



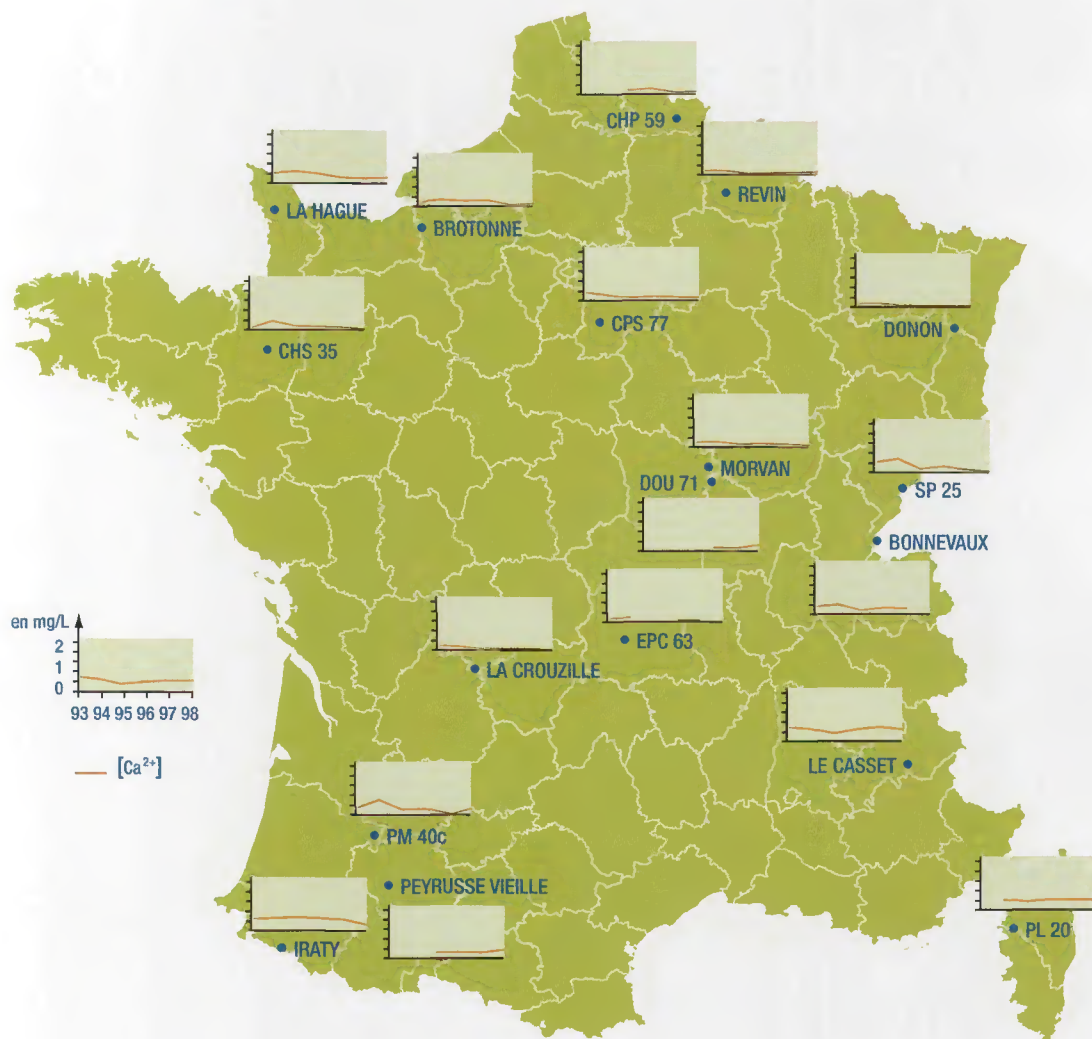
Évolution, de 1993 à 1998, des concentrations moyennes annuelles de sodium (en rouge) et chlorure (en violet) pondérées par la pluviosité **a** dans les retombées humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** dans les retombées totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT

Figure 5 **b**



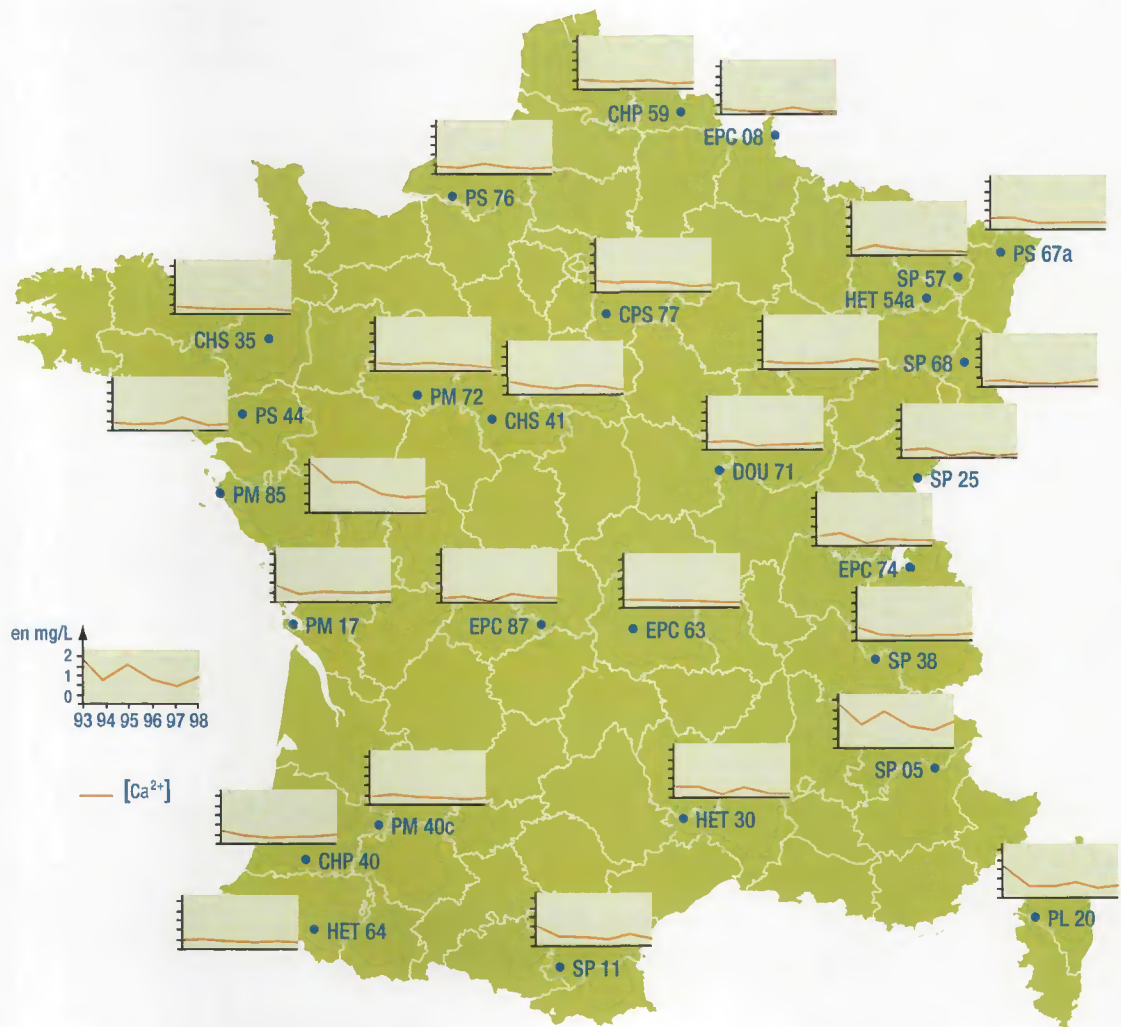
Changes, from 1993 to 1998, in mean annual precipitation weighted sodium (in red) and chloride (in purple) concentrations in **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) precipitation in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 6 **a**



Évolution, de 1993 à 1998, des concentrations moyennes annuelles de calcium pondérées par la pluviosité **a** dans les retombées humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** dans les retombées totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 6 **b**



Changes, from 1993 to 1998, in mean annual precipitation weighted calcium concentrations in **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) precipitation in the MERA and CATAENAT networks.

4.1.3 Tendances pluriannuelles des concentrations de 1993 à 1998

Un des objectifs des réseaux MERA et CATAENAT est de rechercher l'existence de tendances significatives de l'évolution des concentrations ou des dépôts. Une réponse fiable à cette question ne peut être donnée qu'après une période minimale de 10 ans d'observation. Il convient donc d'être extrêmement prudent concernant les débuts de tendances uniquement visuelles et intentionnellement non confirmées par des calculs statistiques (la période de six ans étant trop courte) qui sont résumés dans le tableau 8. Il faut bien garder à l'esprit qu'un grand nombre de ces tendances visuelles sont soit faibles, soit liées à une variabilité inter-annuelle forte, et peuvent en conséquence ne pas se confirmer dans les années à venir.

On observe surtout, en gardant à l'esprit les précautions énoncées précédemment, une diminution des concentrations de sulfate et d'ammonium dans respectivement 36 et 39 % des cas potentiels (les deux types de retombées confondues), et dans environ 12 % des cas une augmentation du pH en partie liée à la diminution du sulfate. Cette amorce de diminution en sulfates dans les eaux de pluie correspond aux réductions très importantes (plus de 60 %) des émissions sous forme de SO_2 depuis les années 80. Il se peut, bien entendu, que cette tendance à la baisse soit plus ancienne, comme on le voit sur des sites où les mesures existent depuis 1985 (Probst *et al.*, 1995 a) mais dont on ne peut rendre compte ici à cause du début récent des mesures.

La diminution du calcium (19 %) pourrait être liée à la réduction des émissions de poussières qui suivent une évolution comparable à celle des émissions du SO_2 (Probst *et al.*, 1995 a). Pour les autres sites et pour les autres ions, les nombres d'augmentations et de diminutions s'équilibrent et on ne voit pas de tendance se dessiner.

Tableau 8 : Récapitulatif des tendances observées visuellement entre 1993 et 1998 sous forme d'une augmentation (+) ou d'une diminution (–) des concentrations moyennes pondérées des ions. Ne s'agissant que d'une période de six ans, il convient d'être très prudent quant à une possible surévaluation des tendances faibles, et intentionnellement non confirmées par des calculs statistiques.

Table 8: Visually observed tendencies for increase (+) or decrease (–) in mean weighted concentrations between 1993 and 1998 for the different ions. Because of the short six year period of investigation, great care must be taken in not to over-estimate these tendencies. Therefore, the tendencies presented were intentionally not confirmed by statistical calculations.

Site	Retombées humides	Retombées totales
Le Casset	(-) NH ₄	non mesurées
Donon	(-) NH ₄ ; (-) SO ₄	non mesurées
Bonnevaux	(-) NH ₄	non mesurées
Iraty	(-) NH ₄ ; (-) SO ₄	non mesurées
Morvan	(-) NH ₄	non mesurées
Revin	(-) NH ₄	non mesurées
Brotonne	(-) NH ₄	non mesurées
La Crouzille	(-) NH ₄	non mesurées
La Hague	(-) NO ₃ ; (-) NH ₄	non mesurées
Peyrusse	(-) NH ₄	non mesurées
CHP 40	non mesurées	
CHP 59	série trop courte	(-) Na ; (-) Ca ; (-) Cl
CHS 35	(+) pH ; (-) NH ₄ ; (-) SO ₄	(-) NH ₄ ; (-) Ca
CHS 41	non mesurées	(-) Ca
CPS 77	(-) Ca ; (-) SO ₄	(+) pH ; (-) NH ₄
DOU 71	série trop courte	(+) K
EPC 08	non mesurées	
EPC 63	série trop courte	(-) K ; (-) Ca ; (-) SO ₄
EPC 74	non mesurées	(-) Mg ; (-) SO ₄
EPC 87	non mesurées	(+) pH ; (+) Na ; (-) SO ₄ ; (+) Cl
CHA 67a	non mesurées	série trop courte
HET 30	non mesurées	(-) SO ₄
HET 54a	non mesurées	(+) pH ; (-) NH ₄
HET 64	non mesurées	(-) Ca ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄
PL 20	série trop courte	(-) K
PM 17	non mesurées	
PM 40c	(-) Na ; (-) Mg ; (-) SO ₄ ; (-) Cl	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄
PM 72	non mesurées	(+) pH ; (-) SO ₄
PM 85	non mesurées	(-) pH ; (-) Ca
PS 44	non mesurées	
PS 67a	non mesurées	(-) NH ₄ ; (-) Ca ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄
PS 76	non mesurées	
SP 05	non mesurées	(-) Ca
SP 11	non mesurées	
SP 25	(+) Na ; (+) Cl	(-) SO ₄
SP 38	non mesurées	(-) SO ₄
SP 57	non mesurées	(-) SO ₄
SP 68	non mesurées	(-) K

Aucune augmentation ou diminution constante n'est observée depuis six ans parmi les indicateurs de l'évolution d'éléments d'origine marine et terrestre, à l'exception du magnésium qui montre une diminution constante de ses concentrations dans un seul site (Haute-Savoie, EPC 74) entre 1993 et 1998, sans que l'on puisse avancer d'explication. Dans tous les autres sites et pour les autres ions, on observe soit une tendance assez irrégulière soit une stabilité des concentrations.



4.2 Évolution des dépôts annuels

4.2.1 *Retombées humides stricto sensu*

Les caractéristiques générales des dépôts atmosphériques tous sites confondus, moyennées pour l'ensemble des années 1993 à 1998, sont présentées dans le tableau 9. Les valeurs de ces dépôts sont étroitement liées à la pluviométrie et il est bien évident que les sites à forte pluviosité auront des dépôts importants. La moyenne sur les six ans de mesures permet seulement de situer l'ordre de grandeur des retombées humides de chaque espèce, les fluctuations inter-annuelles pouvant être importantes quelle que soit l'espèce considérée.

Le tableau 9 indique que les dépôts moyens annuels en ions H^+ sont d'environ 100 g/ha/an sachant qu'un dépôt de 200 g/ha/an pourrait affecter certains écosystèmes sensibles. L'apport au sol en éléments d'origine marine est bien évidemment le plus important, avec en moyenne 10 kg/ha/an de sodium et 17 kg/ha/an de chlorures. Les apports moyens annuels en sulfates sont de 5 kg/ha/an avec une répartition différente selon les sites entre sulfates d'origine marine et entropique. Cette dernière peut être estimée en tenant compte de la situation géographique du site et de son exposition aux flux marins. L'apport au sol en potassium est relativement faible, 0,8 kg/ha/an, dont une part importante provient également des embruns marins. Les apports océaniques représentent donc une grande part des dépôts annuels de ces espèces auxquelles on doit également ajouter le magnésium (1,6 kg/ha/an) et le calcium (3,9 kg/ha/an), même si d'autres sources contribuent à leurs dépôts. Les dépôts moyens annuels en composés azotés essentiels au bon équilibre des écosystèmes naturels, nitrates et ammonium, sont respectivement de 2,8 et 4,9 kg/ha/an.

Même si six années ne sont pas suffisantes pour parler de tendance à long terme, on peut déjà essayer de dégager des premiers éléments sur les dépôts annuels enregistrés entre 1993 et 1998. On détecte ainsi les effets probables des efforts de réduction des émissions poursuivis ces dernières années. Une diminution significative apparaît ainsi pour

deux éléments, l'ammonium et les sulfates. En revanche, des éléments comme le chlorure, le sodium, le magnésium ou le potassium dépendent plutôt des variations climatiques annuelles prenant en compte l'érosion. D'après les mesures des réseaux MERA et CATAENAT, aucune évolution n'apparaît pour les ions H^+ alors que dans le bassin versant d'Aubure dans les Vosges (Probst *et al.*, 1995 a) et dans certains autres pays une tendance est observée. Les dépôts annuels en nitrates ont diminué légèrement entre 1993 et 1997, mais cette tendance s'est inversée en 1998, comme pour la quasi-totalité des éléments. Le tableau 9 met en évidence une année 1996 particulièrement acide avec 138 g/ha/an de H^+ alors que pour les autres années les valeurs se situent entre 80 et 100 g/ha/an. Il faut préciser que l'année 1996 fût marquée par un déficit pluviométrique sur toute la moitié Nord du pays, ce qui concerne 12 stations sur les 18 entrant dans les calculs statistiques. À noter également des retombées nettement plus importantes en 1998 qu'en 1997 pour la totalité des éléments chimiques, avec une pluviosité observée en 1998 légèrement supérieure dans la moitié des stations et inférieure dans l'autre moitié ; une éventuelle étude climatologique permettra peut être d'en discerner les raisons.

Retombées humides	Pluviosité mm	H g/ha	Cl kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	N-NO ₃ kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha
Moyenne	1 133	102	17	5,0	2,8	9,9	4,9	0,8	1,6	3,9
Écart type	396	56	26	2,1	1,1	14,6	2,8	0,7	2,1	2,3
CV (%) ⁽¹⁾	35	54	148	40	38	147	58	82	125	59
Médiane ⁽²⁾	1 033	96	9	4,6	2,8	4,9	4,2	0,6	1,0	3,2
Minimum	513	12	1	1,6	0,9	0,5	0,8	0,05	0,06	1,2
Maximum	2 377	268	114	10,8	6,4	65,0	13,6	3,7	10,2	11,9
1993	1 182	83	13,8	6,1	3,2	7,8	7,7	0,8	1,3	4,5
1994	1 179	81	19,4	5,6	3,0	11,4	6,5	1,0	2,1	5,7
1995	1 170	103	19,6	5,3	3,1	10,7	5,5	0,9	1,8	3,3
1996	1 002	138	14,9	4,7	2,9	8,7	3,7	0,7	1,3	3,6
1997	1 121	92	15,6	4,1	2,3	8,9	3,2	0,8	1,3	3,1
1998	1 122	109	20,8	4,8	2,8	12,0	3,7	0,9	2,2	3,4

1. Le CV (coefficient de variation) est l'écart type exprimé en % de la moyenne.
2. Valeur centrale séparant les données en deux parties égales (50 % au-dessus et 50 % au-dessous).

Tableau 9 : Statistiques globales calculées à partir des 18 sites MERA et CATAENAT de mesures des retombées humides (*stricto sensu*) pour la période 1993-1998 et basées sur les dépôts annuels des espèces majeures.

Table 9: General statistics for wet deposition measured from 1993 to 1998 in 18 French MERA and CATAENAT sites ; data are based on annual deposition values per site.

L'ensemble des résultats des dépôts humides par station et par année est illustré graphiquement sur les figures 7a, 8a, 9a, 10a et 11a, mais également sous forme de tableaux en annexe 3. Ces cartes permettent d'identifier les zones de fortes retombées ainsi que les fluctuations annuelles sur un site donné.

Retombées acides et acidifiantes

Les dépôts en ions H^+ sont nettement plus importants dans la région Nord-Est de l'hexagone, avec un apport au sol dépassant fréquemment les 100 g/ha/an. Le maximum annuel pour l'ensemble des sites de mesures a été observé en 1996 avec 268 g/ha/an dans les Vosges (Donon), 212 g/ha/an dans les Ardennes (Revin) et 180 g/ha/an dans le Doubs (SP 25). On peut également noter pour cette même année un apport annuel de 212 g/ha/an dans les Landes (PM 40c), alors que les deux autres sites voisins du Gers (Peyrusse Vieille) et des Pyrénées-Atlantiques (Iraty) n'enregistrent des dépôts que de 110 g/ha/an. Les origines des polluants probablement différentes dans ces deux régions opposées géographiquement occasionnent cette acidité élevée. Les apports en H^+ dans les autres régions françaises (Bretagne, Rhône-Alpes, Centre, Limousin) varient globalement de 50 à 75 g/ha/an. À noter le site Corse qui présente des dépôts en H^+ significatifs, avec un maximum en 1995 de 242 g/ha/an. Ce site est influencé aussi bien par des masses d'air ayant traversé des zones industrielles (Nord de la France, Est de l'Europe), par des sources marines (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986) ou par la pollution liée à la région de Marseille (zone industrielle de Fos-sur-mer). Des valeurs élevées de H^+ ont aussi été observées en 1995 dans deux autres sites à typologie urbaine, dans le Nord (CHP 59) et en Île-de-France (CPS 77). Les fluctuations annuelles montrent généralement une augmentation du dépôt annuel de 1993 à 1996, puis une diminution en 1997 suivi d'une nouvelle augmentation en 1998.

Les dépôts en nitrates et sulfates, espèces s'associant avec H^+ pour former les acides correspondants, présentent des similitudes quant à leur variation annuelle et leur distribution spatiale, même si leurs sources d'émissions diffèrent notablement. La répartition spatiale de leurs dépôts est plus uniforme sur le territoire que celle des ions H^+ , mais les maxima sont toujours situés dans le quart Nord-Est avec des valeurs variant de 3 à 5 kg/ha/an pour les nitrates et de 4 à 9 kg/ha/an pour les sulfates. Il apparaît néanmoins une baisse assez nette des dépôts entre 1993 et 1998 pour les sites du grand quart Nord-Est (SP 25, Donon, Bonnevaux, Morvan). Les valeurs les plus importantes ont été généralement observées en 1993-1994.

Les apports en ammonium sont relativement importants et reflètent les fortes émissions françaises d'ammoniac (de l'ordre de 500 000 t/an) dont 75 % à 80 % retombent sur notre

territoire (EMEP/MSC-W, 1997). Les dépôts sont en forte diminution depuis 1993 sur un grand nombre de sites. Bien que le quart Nord-Est présente toujours les dépôts les plus importants, les dépôts moyens se situant autour de 3,5 kg/ha/an, la répartition spatiale semble dorénavant plus uniforme par rapport aux années 1993-1994-1995.

Retombées alcalines d'origine marine et terrestre

Les quatre éléments potassium, magnésium, sodium et chlorures montrent des similitudes quant à leur répartition spatiale. Les sites de Haute-Normandie (La Hague), de Corse (PL 20) et des Landes (PM 40c) sont, de par leur proximité de la mer, les plus chargés en ces différents éléments. Les apports terrigènes comportant du calcium, du magnésium et du potassium s'effectuent essentiellement lors de flux méditerranéens et atteignent principalement le secteur Est du territoire, comme l'ont montré Plaisance *et al.* (1996). Ces nutriments sont essentiels à l'équilibre des écosystèmes terrestres.

4.2.2 Retombées totales

Les caractéristiques générales des dépôts totaux sont présentées de façon synthétique dans le tableau 10 et en détail en annexe 4. Les dépôts en acidité directe (H^+) ne dépassent pas 0,6 kg par hectare et par an, alors que l'on estime que des dépôts de protons peuvent affecter les écosystèmes les plus sensibles à l'acidification dès 0,2 kg/ha/an. Dans les sites où les deux mesures de dépôts humides et totaux sont réalisées (figure 7), on constate une valeur plus faible pour les retombées humides du fait de l'absence de collecte de poussières, généralement de nature basique, et qui provoquent l'augmentation du pH en se dissolvant.

Les dépôts totaux en anions et cations majeurs, à l'exception des H^+ , se situent entre 0,1 et 112,7 kg/ha/an selon l'espèce ionique et le site considéré. La variabilité des données de dépôt est forte, car 68 % des valeurs oscillent entre 32 % et 76 % de la moyenne nationale sur 6 ans (voir les coefficients de variation (CV) dans le tableau 10). Les disparités géographiques des mesures de concentrations détaillées précédemment sont encore plus accentuées pour les dépôts (figures 7b à 11b) notamment pour les régions de l'Est où la pluviométrie est la plus élevée. Pour les années 1993 à 1998, les valeurs de pluviométrie ont varié de 550 mm à 4 600 mm, tous sites confondus. La même concentration moyenne pondérée peut donc correspondre à des dépôts très différents d'un site à l'autre.

L'influence significative des apports marins est illustrée sur la figure 5. Les dépôts annuels de sodium, de chlorure et de magnésium diminuent en effet au fur et à mesure qu'augmente la distance à la côte atlantique. Le site en Corse, bien qu'il soit situé à environ

12 km du golfe de Porto, reçoit les mêmes apports moyens de ces trois ions que les sites les plus proches de la côte atlantique, situés chacun à environ 1 km de la mer. Pour l'ensemble des autres ions, une distribution irrégulière d'Ouest en Est des dépôts est constatée, témoignant ainsi d'un effet local et régional plutôt que d'un transport à moyenne ou longue distance des polluants constituant ces dépôts.

Retombées totales	Pluviosité mm	H g/ha	Cl kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	N-NO ₃ kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha
Moyenne	1 184	114	21,1	6,7	3,5	12,2	5,0	1,6	1,7	6,3
Écart type ⁽¹⁾	480	63	6,6	1,5	1,2	3,9	2,1	0,8	0,5	4,6
CV (%) ⁽²⁾	40,5	55	31,5	22,6	33,9	32,3	42,1	48,5	31,4	75,5
Médiane ⁽³⁾	1 102	105	11,9	6,1	3,3	7,1	4,7	1,4	1,0	4,8
Minimum	548	6	2,7	2,9	1,6	1,2	0,9	0,3	0,1	2,0
Maximum	4 605	611	112,7	24,1	10,7	64,0	14,1	5,2	8,2	27,1
1993	1 110	110	20,6	7,9	3,7	12,1	6,4	1,6	1,8	7,8
1994	1 282	119	21,9	7,3	3,5	13,3	4,9	1,9	1,9	7,1
1995	1 279	137	23,6	7,3	3,9	13,0	5,6	1,9	1,8	5,7
1996	1 171	137	19,8	6,5	3,7	11,6	4,9	1,4	1,5	5,9
1997	1 113	88	16,8	5,3	2,9	9,5	3,9	1,4	1,2	4,6
1998	1 146	91	21,9	5,8	3,2	12,6	4,5	1,4	1,7	4,9

1. 68 % des valeurs de concentrations moyennes pondérées se trouvent dans la fourchette « moyenne $\pm$ écart type ».
2. Le CV (coefficient de variation) est l'écart type exprimé en % de la moyenne.
3. Valeur centrale séparant les données en deux parties égales (50 % au-dessus et 50 % au-dessous).

Tableau 10 : Statistiques globales se basant sur les retombées totales des 27 sites CATAENAT entre 1993 et 1998 des cations et anions majeurs. Les valeurs sont en kg/ha/an, excepté pour les protons (H⁺) pour lesquels l'unité est défini en g/ha/an.

Table 10: General statistics from the 27 CATAENAT sites with annual bulk deposition values measured from 1993 to 1998 for the major cations and anions. Values are in kg/ha/yr, protons (H⁺) excepted, which are in g/ha/yr.

Retombées acides et acidifiantes

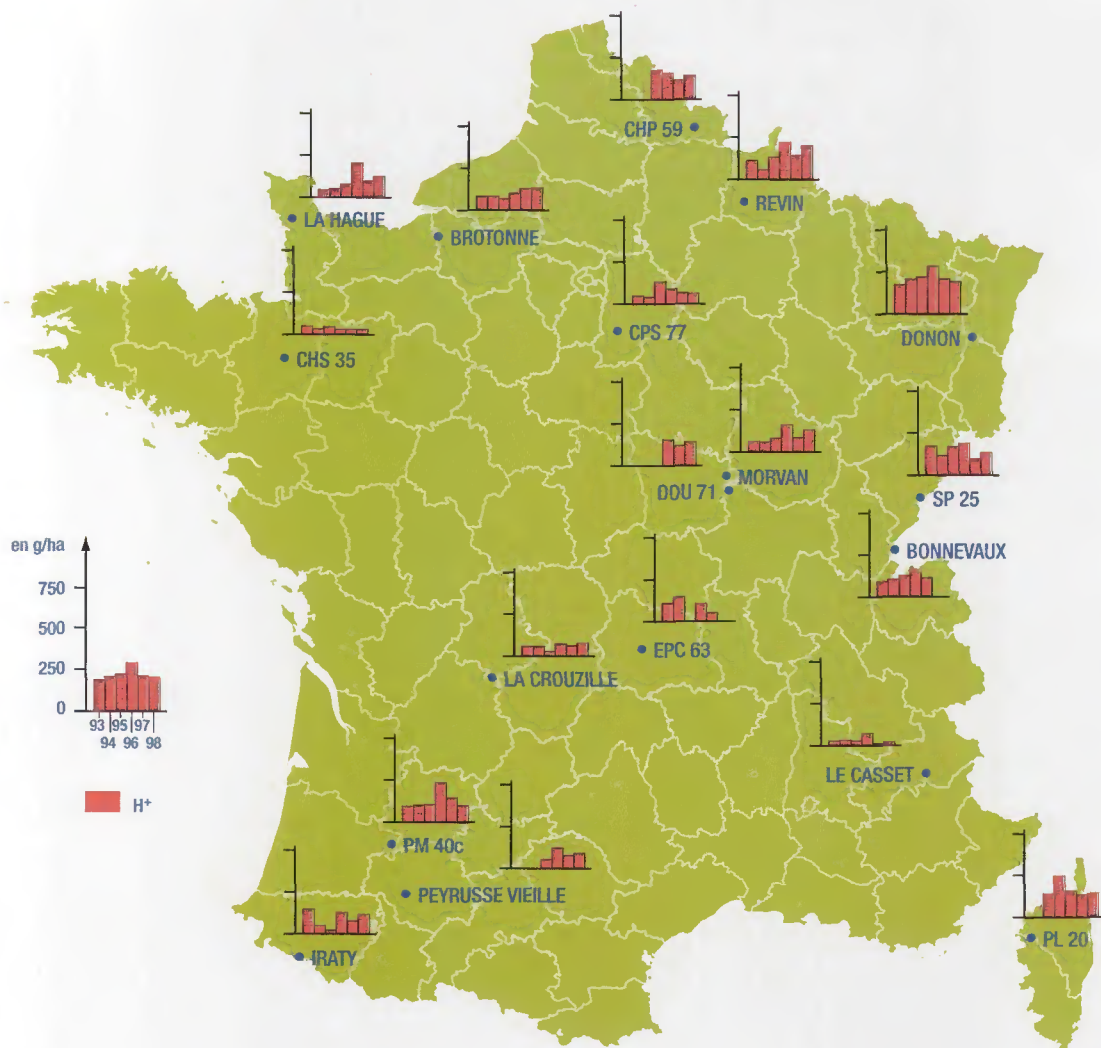
Les dépôts de **protons** (acidité directe) sont généralement faibles, le maximum a été atteint en 1995 au site du Mont Aigoual (HET 30) avec un dépôt total annuel en H⁺ de 600 g/ha et ceci grâce à une pluviométrie supérieure à 2 700 mm. On peut distinguer deux grands groupes : ceux à dépôts très faibles (≤ 50 g/ha au moins trois années sur six) et ceux à faibles apports (> 50 g/ha au moins trois années sur six). Dans le premier

groupe, très peu influencé par des apports d'acidité directe, on retrouve les sites de Bretagne (CHS 35), de la Sarthe (PM 72), du Loir-et-Cher (CHS 41), de Vendée (PM 85), du Massif Central (EPC 63), des Hautes-Alpes (SP 05) et du Nord des Vosges (SP 57).

Un des éléments majeurs des retombées acidifiantes est certainement le sulfate. Pour trois des stations suivantes, situées en plein champ, le $S-SO_4$ dépasse les 10 kg/ha/an et ceci pour trois années sur six :

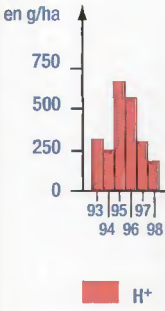
1. au Mont Aigoual (HET 30) en raison d'une importante pluviosité annuelle (voir tableau 4) et non à cause d'une forte pollution ;
2. en Corse (PL 20), en raison d'apports marins élevés en sus des masses d'air enrichies en polluants ;
3. dans les Pyrénées-Atlantiques (HET 64), où l'on peut supposer une influence des dépôts de soufre à l'air libre issus de la désulfurisation du gaz naturel exploité dans le passé à Lacq (à 30 km au nord de HET 64).

Figure 7 a



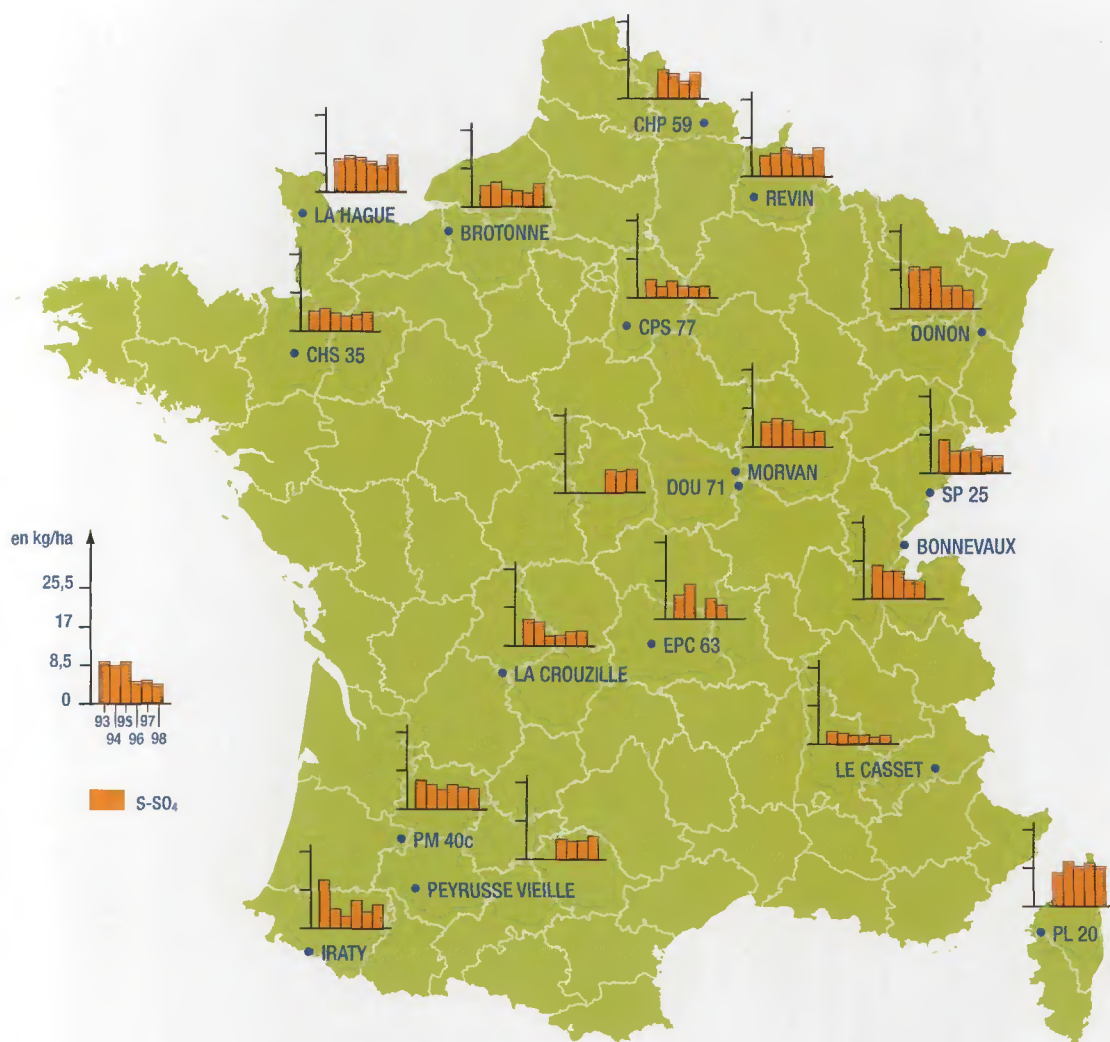
Évolution, de 1993 à 1998, des dépôts annuels de protons (H⁺) via les retombées
a humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** totales, à droite, des réseaux MERA et
 CATAENAT.

Figure 7b



Changes, from 1993 to 1998, in annual proton (H^+) **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) deposition, measured in the MERA and CATAENAT networks.

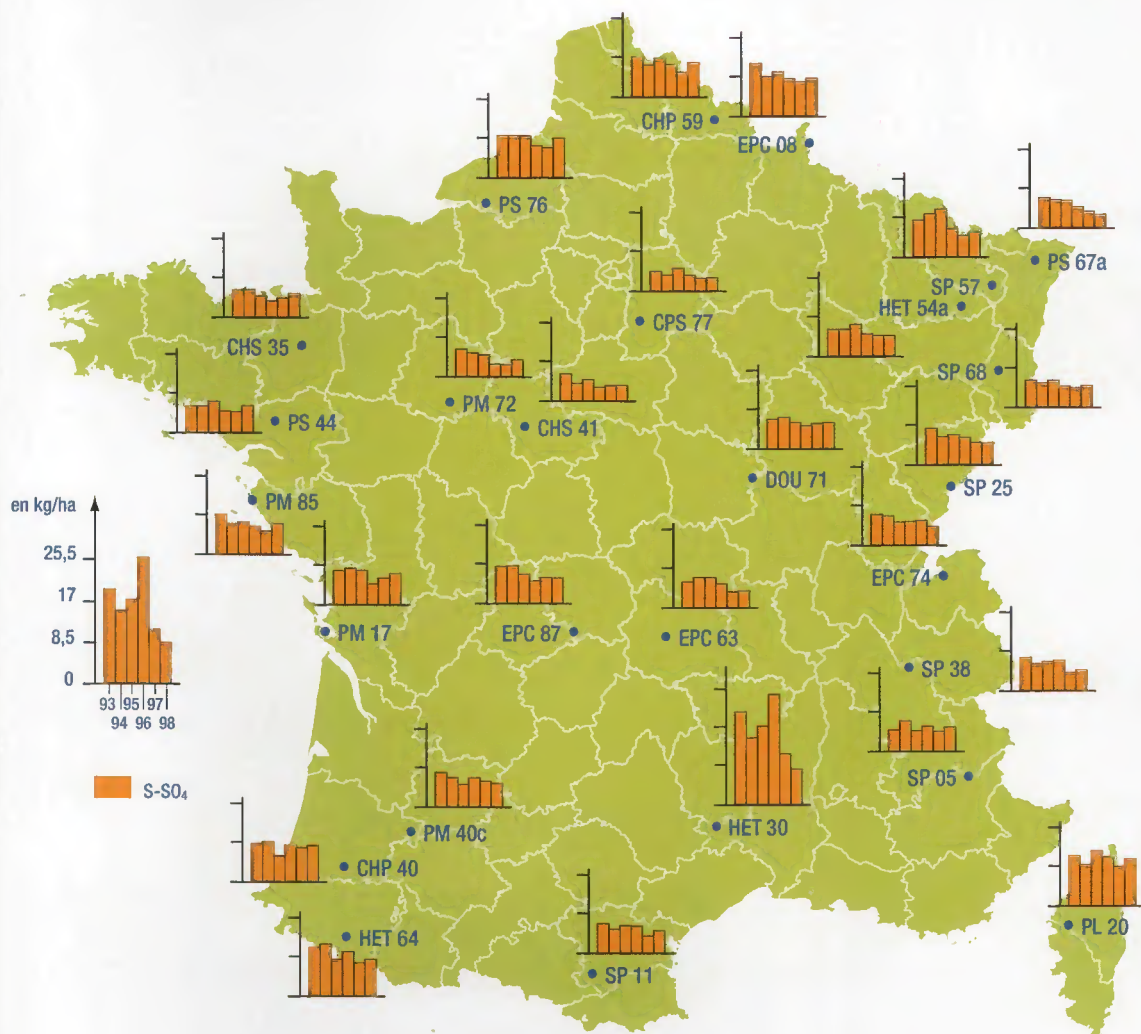
Figure 8 a



Évolution, de 1993 à 1998, des dépôts annuels de sulfate (S-SO₄) via les retombées

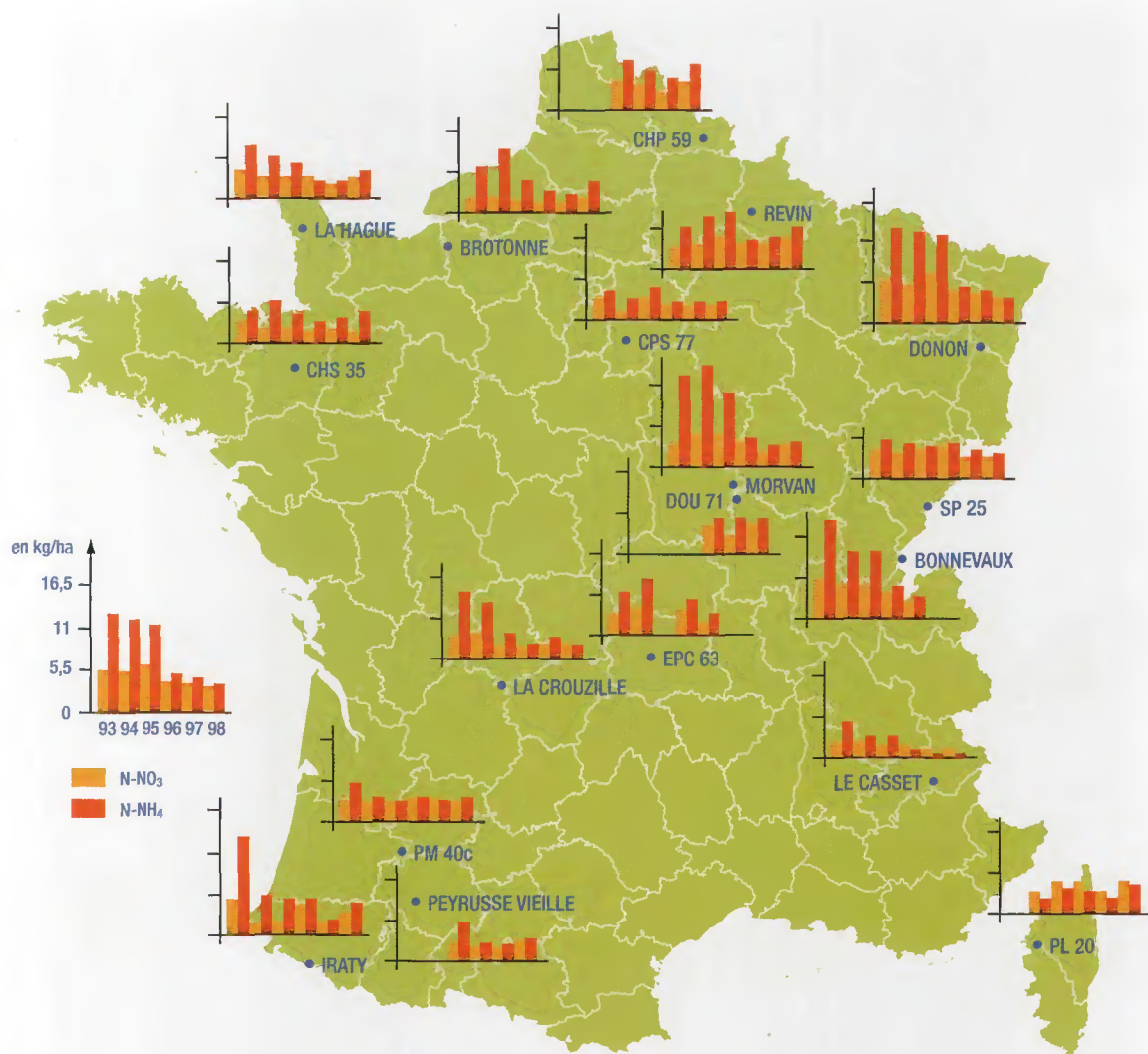
a humides *stricto sensu*, à gauche, **b** et totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 8 **b**



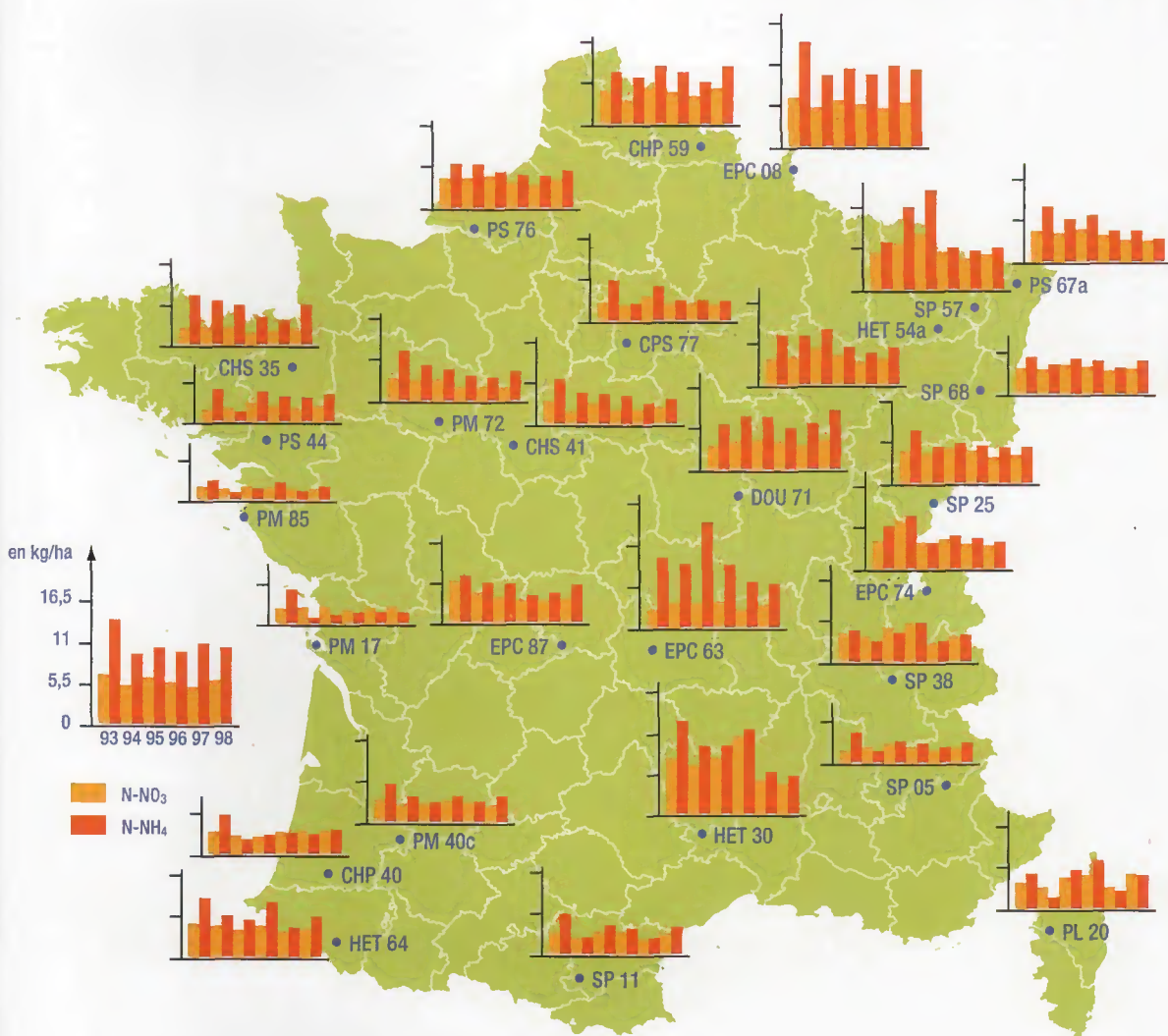
Changes, from 1993 to 1998, in annual sulphate ($S-SO_4$) **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) deposition, measured in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 9 a



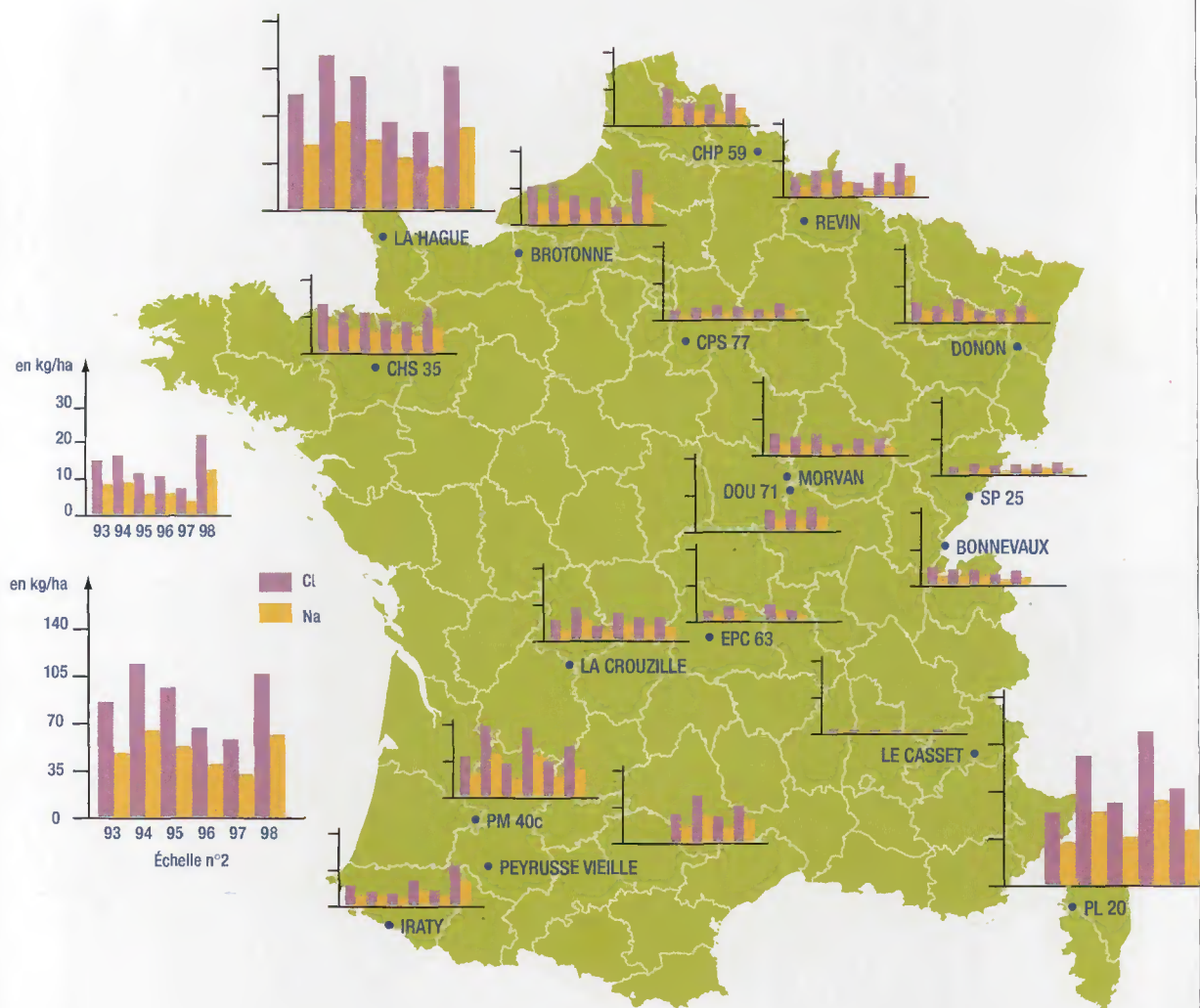
Évolution, de 1993 à 1998, des dépôts annuels de nitrate (N-NO₃, en orange) et d'ammonium (en N-NH₄, en rouge) via les retombées **a** humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 9 **b**



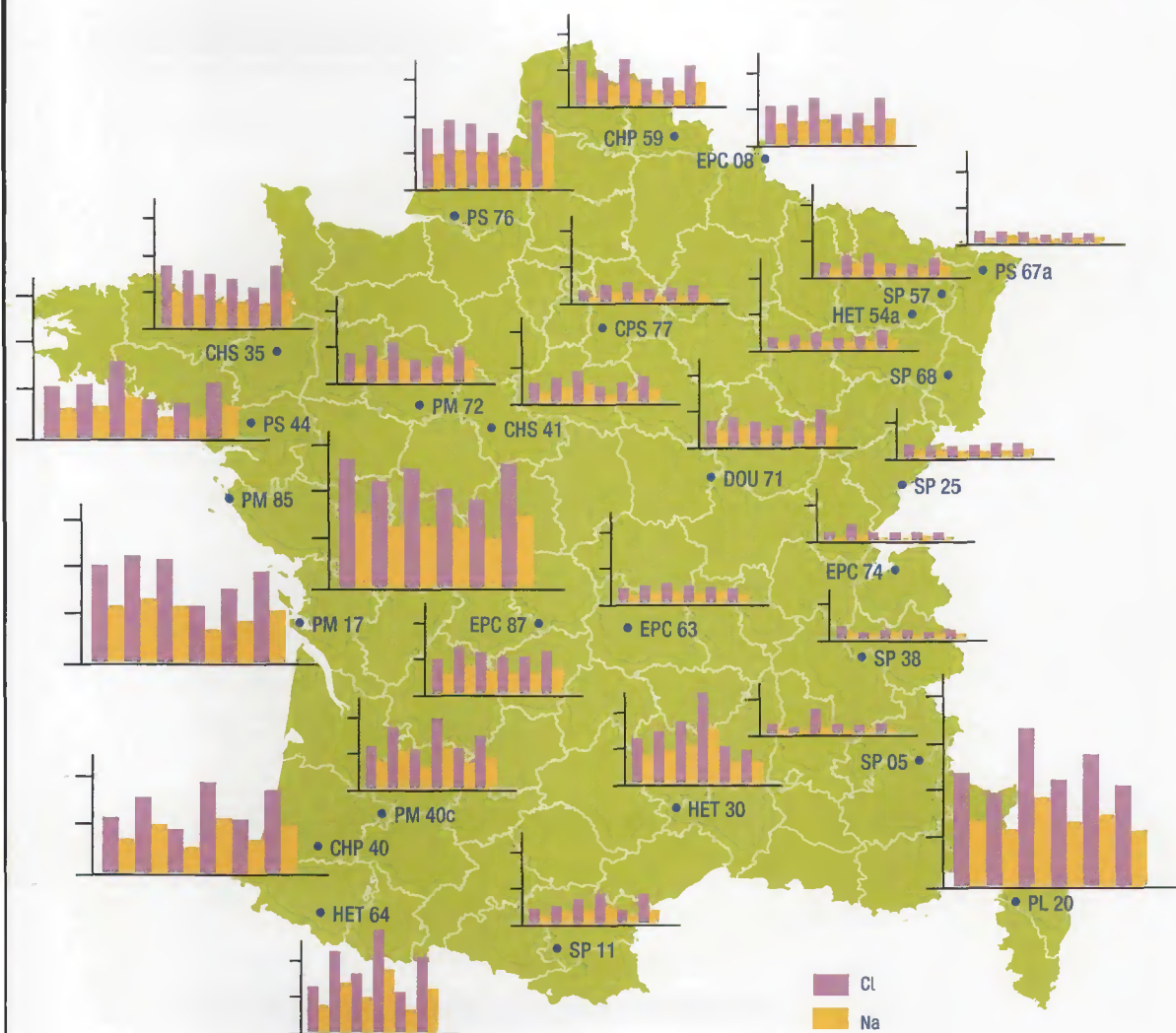
Changes, from 1993 to 1998, in annual nitrate (N-NO₃, in orange) and ammonium (N-NH₄, in red) **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) deposition, measured in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 10 **a**



Évolution, de 1993 à 1998, des dépôts annuels de sodium (en jaune) et de chlorure (en violet) via les retombées **a** humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

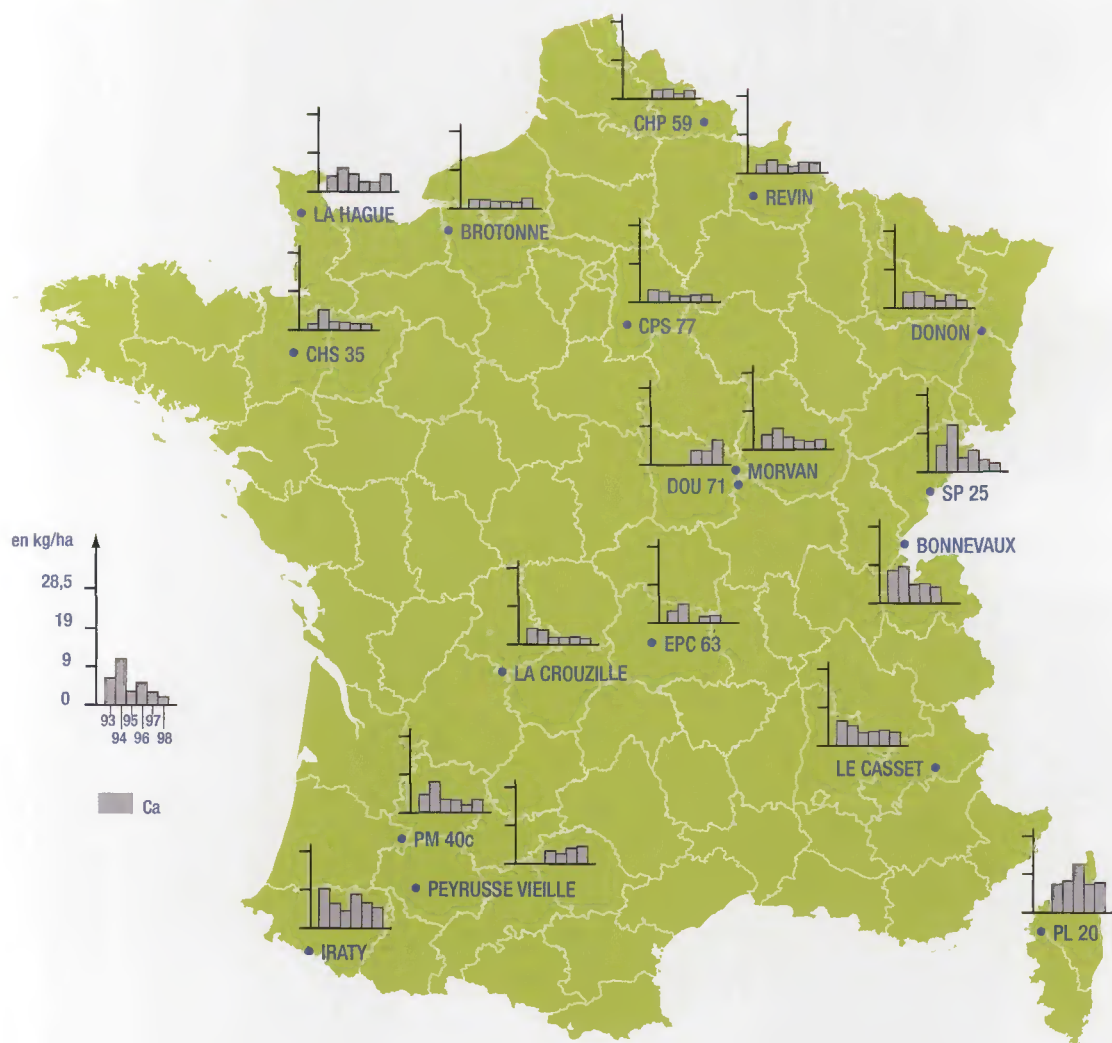
Figure 10 **b**



Changes, from 1993 to 1998, in annual sodium (in yellow) and chloride (in purple)

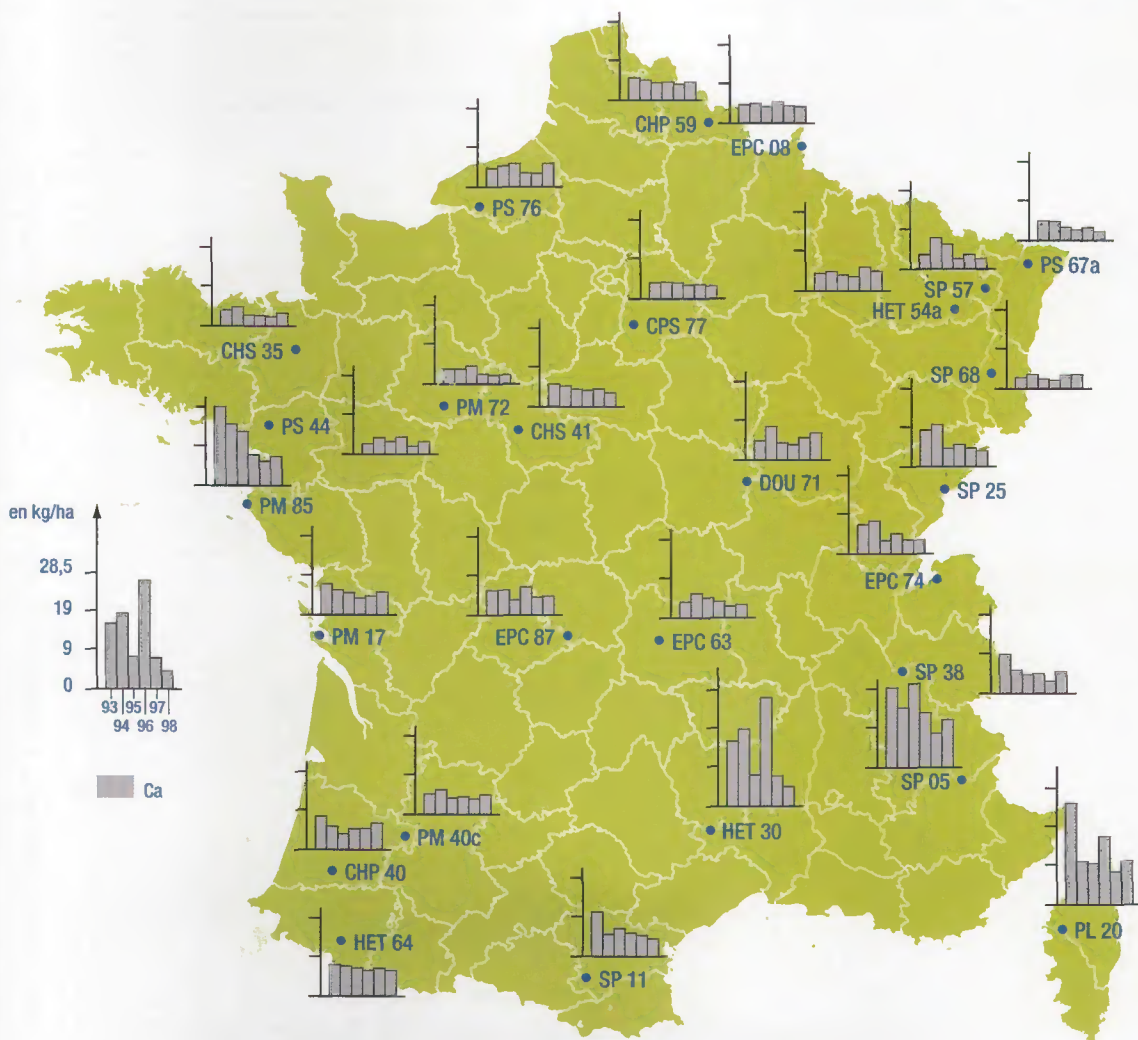
a wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) deposition, measured in the MERA and CATAENAT networks.

Figure 11 a



Évolution, de 1993 à 1998, des dépôts annuels de calcium via les retombées **a** humides *stricto sensu*, à gauche, et **b** totales, à droite, des réseaux MERA et CATAENAT.

Figure 11 **b**



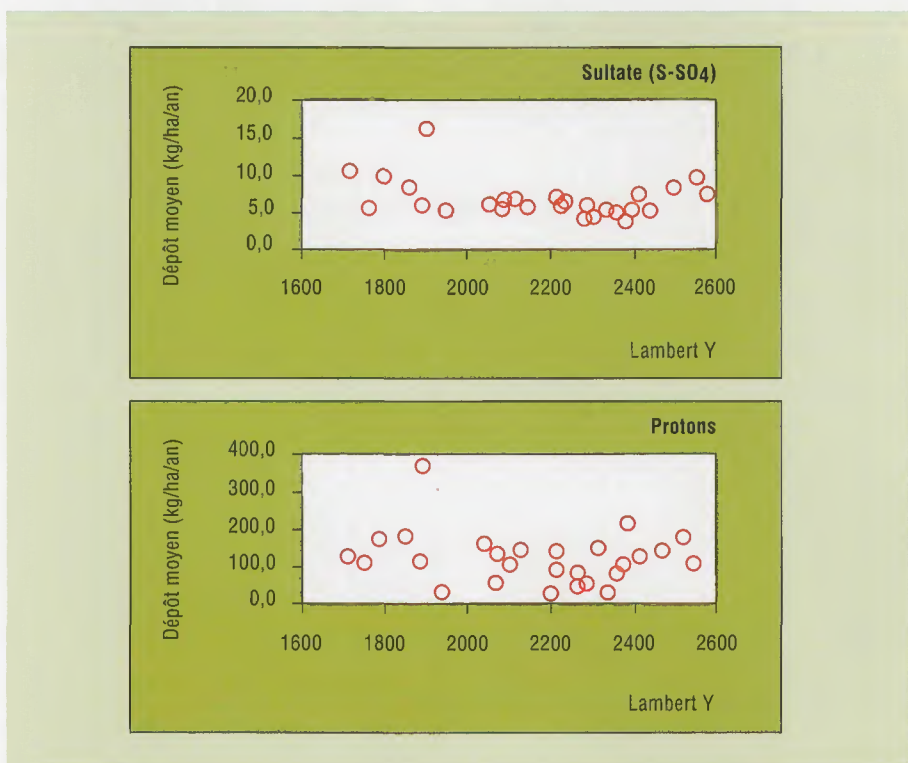
Changes, from 1993 to 1998, in annual calcium **a** wet-only (map on the left) and **b** bulk (map on the right) deposition, measured in the MERA and CATAENAT networks.

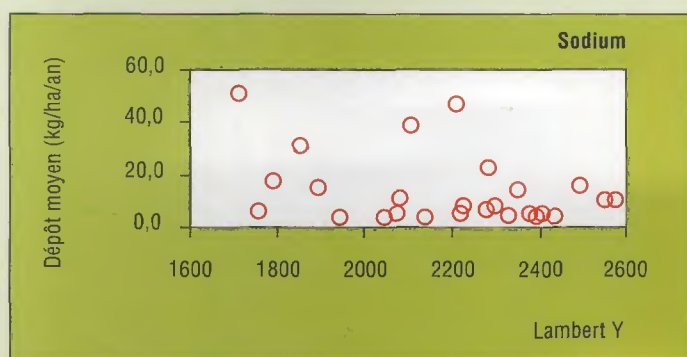
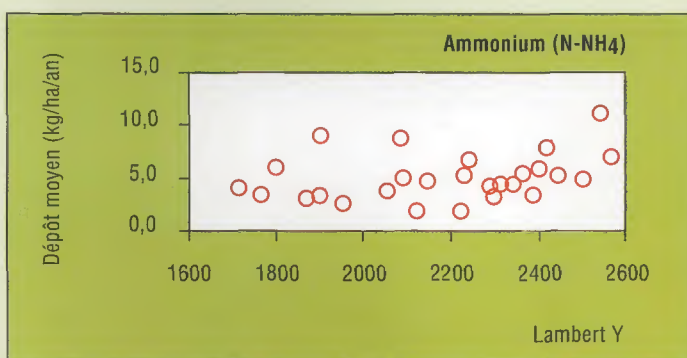
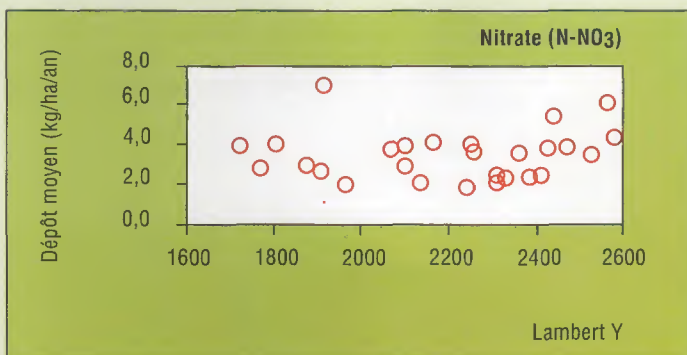
Seuls deux sites reçoivent des apports élevés de nitrate (> 5 kg/ha/an en azote de NO_3 , trois années sur six) : sur le Mont Aigoual (HET 30), soumis à une forte pluviosité, et dans les Ardennes (EPC 08), sans doute influencé par une circulation automobile plus dense en Belgique (due à une plus forte densité de la population) et une fertilisation intensive aux Pays-Bas (transformation chimique dans l'air de l'ammonium vers le nitrate).

D'une manière générale, les apports d'ammonium sont bien plus élevés que ceux du nitrate. Onze des 27 sites dépassent au moins trois années sur six le seuil de 5 kg/ha/an en azote de NH_4 . Les apports les plus importants sont observés dans les Ardennes (EPC 08), avec une moyenne sur six ans de presque 11 kg/ha/an en azote. En dix ans, ce site aura donc accumulé plus de 100 kg d'azote à l'hectare, ce qui correspond à une fertilisation azotée issue de l'ammonium, à laquelle s'ajouterait celle de l'azote nitrique.

Figure 12 : Distribution des moyennes sur la période 1993-1998 des dépôts (en kg/ha/an) des 27 sites CATAENAT en fonction de la coordonnée Lambert Y [11] (Ouest = 1 600 - Est = 2 600 en km) de ces sites.

Figure 12: Mean annual deposition (in kg/ha/yr) in the 27 CATAENAT sites plotted against the X-co-ordinates of each site (French co-ordination system called Lambert [11]), West (= 1 600)- East (= 2 600), values are in km.





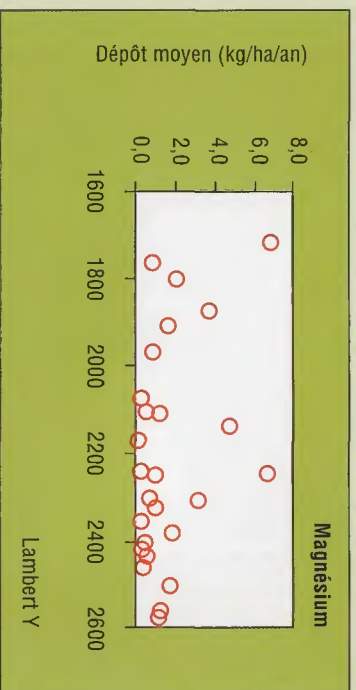
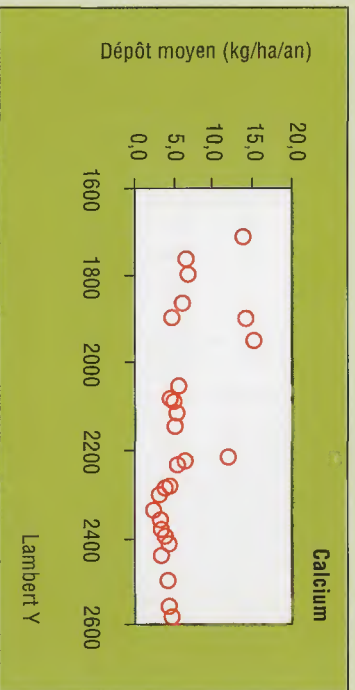
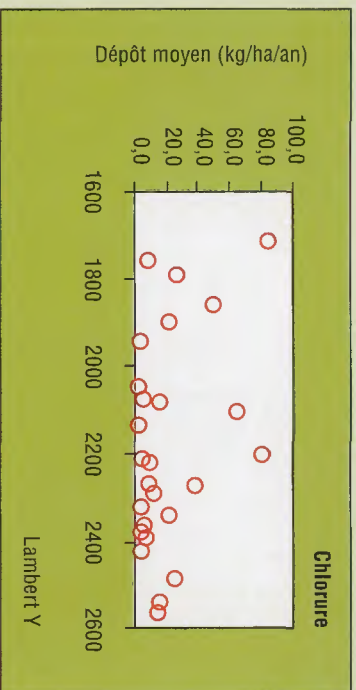
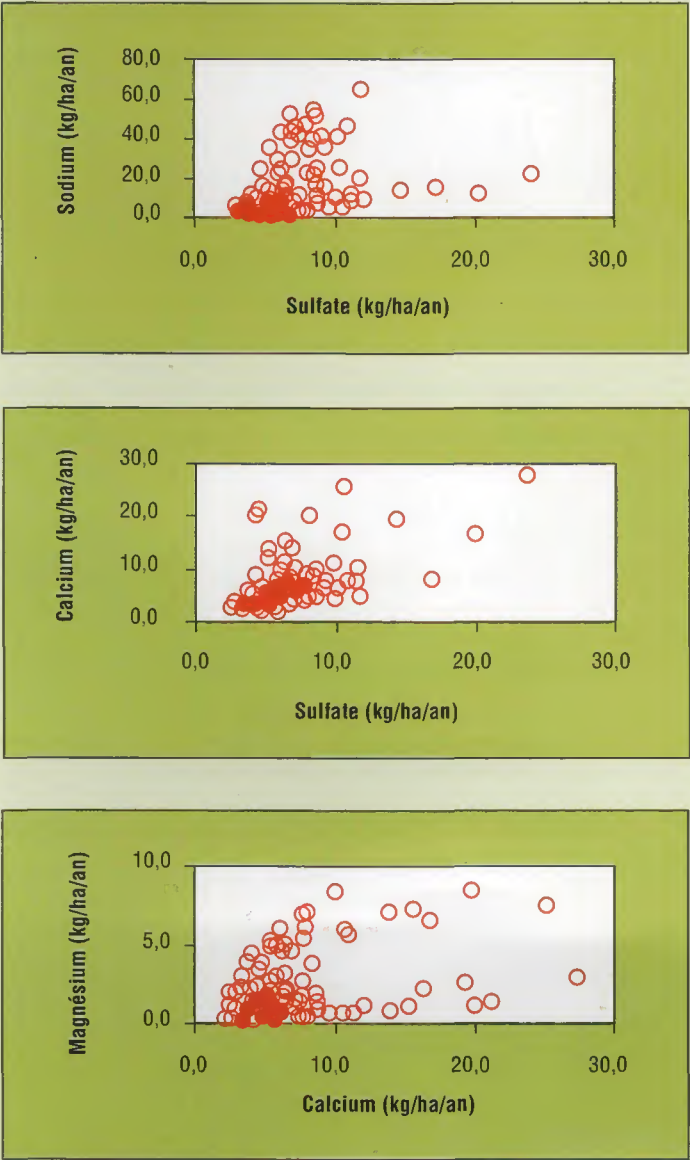
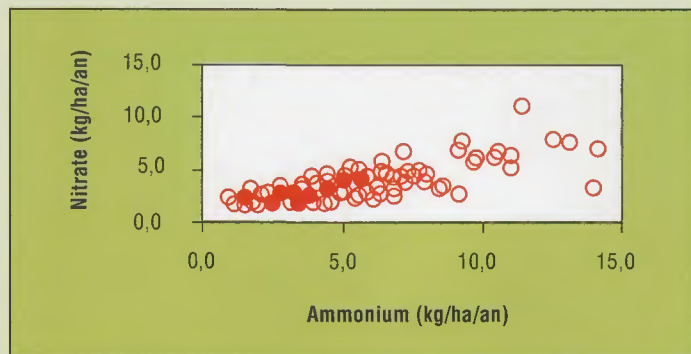
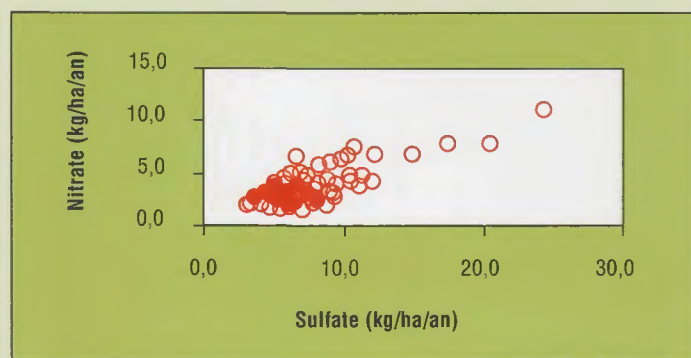
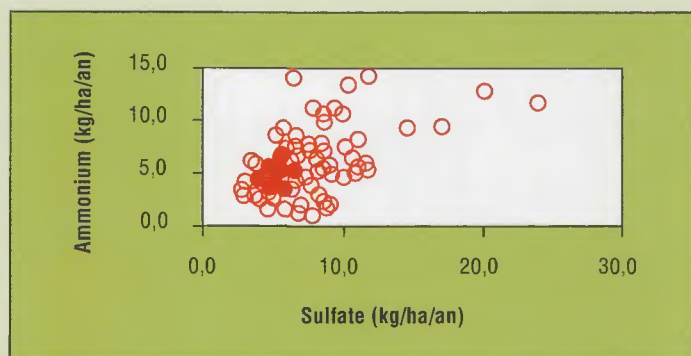


Figure 13 : Relation entre les dépôts moyens annuels des différents ions (en kg/ha/an) pour les années 1993 à 1998 des 27 sites CATAENAT.

Figure 13: Relation between the annual deposition (in kg/ha/yr) of the different ions from 1993 to 1998 in the 27 CATAENAT-sites.





Retombées alcalines d'origine marine et terrestre

Les retombées massiques les plus importantes sont celles du sodium et du chlorure, respectivement 64 et 113 kg/ha/an. Ce sont également les ions montrant le plus de différences d'un site à l'autre (figures 10b). Dans le cas des sites « marins », les dépôts annuels de sodium se situent en moyenne sur 6 ans entre 30 et 50 kg/ha/an, et ceux de chlorure entre 40 et 80 kg/ha/an. Dans le cas des sites « terrestres », les valeurs sont toujours au-dessous de ces fourchettes, et ne représentent par exemple que quelques kg/ha/an dans les sites de l'Est.

Parmi les cations majeurs, le potassium est celui qui présente en moyenne les dépôts massiques les plus faibles, toujours inférieur à 3 kg/ha/an, excepté en deux sites très marins (PM 85 et PL 20) où il se rapproche des 5 kg/ha/an en moyenne.

Le magnésium et le calcium sont des nutriments essentiels et leurs apports par les pluies sont donc importants pour les écosystèmes pauvres. Les apports de magnésium sont fortement dépendants de la longitude, car ils décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la côte atlantique (figure 12). Un écosystème avec une alimentation minérale pauvre (sols pauvres, carences magnésiennes) a donc plus de chances de recevoir des compléments de ce minéral par les précipitations s'il se trouve dans la partie Ouest de la France. Les quantités apportées varient d'Est en Ouest de 0 à 2 kg/ha/an à 4 à 7 kg/ha/an en moyenne.

En revanche le calcium, dont les valeurs se situent entre 3 et 10 kg/ha/an (figures 11b et 12), ne montre pas de différence longitudinale. Une différence importante pour le potassium et le calcium est observée entre les dépôts humides et totaux, en moyenne de respectivement 50 % et 38 %, du fait des apports particuliers en période non pluvieuse.

Ratio entre les espèces dans les dépôts totaux

Les rapports entre les différents ions, même calculés sur un cumul annuel, permettent d'identifier des sources communes. S'il existe une bonne relation entre plusieurs ions, leurs sources d'enrichissement dans les précipitations sont susceptibles d'être les mêmes. La figure 13 montre ces relations pour plusieurs ions. On n'observe aucune relation pour les rapports des dépôts annuels entre le sulfate et le sodium (ni pour le chlorure qui n'est pas présenté ici), le calcium, le magnésium et l'ammonium. En revanche, une relation semble exister entre les apports de sulfate et nitrate et les apports d'ammonium et les nitrates. Ceci indiquerait que les sources d'émissions du nitrate et d'ammonium sont régulièrement à proximité de celles du sulfate.

4.2.3 Tendance des retombées annuelles de 1993 à 1998

Les constats donnés ci-dessous sont soumis aux mêmes réserves que ceux faits sur les tendances des concentrations moyennes du chapitre 4.1.3.

Un début de tendance à la diminution (tableau 11) des concentrations de sulfate dans les dépôts annuels n'apparaît que dans 19 % des 41 cas concernés, de même pour l'ammonium (27 %), le nitrate (19 %) et le calcium (12 %). Les autres ions présents dans les dépôts ne suivent pas obligatoirement les tendances observées pour les concentrations moyennes pondérées, et montrent plutôt une stabilité.

Seuls les dépôts de protons sur le site de Bretagne (CHS 35) et les dépôts de magnésium en Haute-Savoie (EPC 74) montrent une diminution constante d'année en année depuis six ans.

On peut cependant conclure que les dépôts sont généralement trop irréguliers en 6 ans de mesures pour permettre de mettre en évidence une tendance nette.

Tableau 11 : Récapitulatif des tendances à une augmentation (+) ou une diminution (–) des dépôts observées visuellement entre 1993 et 1998 en fonction des ions. Ne s'agissant que d'une période de 6 ans, il convient d'être très prudent quant à une surévaluation possible de ces tendances parfois faibles et intentionnellement non confirmées par des calculs statistiques.

Table 11: Visually observed tendencies for increases (+) or decreases (–) in deposition for the different ions between 1993 and 1998. Because of the short 6-year period of investigation great care must be taken in not to over-estimate these tendencies. Moreover, the tendencies presented were intentionally not confirmed by statistical calculations.

Site	Retombées humides	Retombées totales
Le Casset	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄	non mesurées
Donon	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃ ; (-) K	non mesurées
Bonnevaux	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄	non mesurées
Iraty	(-) NH ₄	non mesurées
Morvan	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃	non mesurées
Revin	(+) H ⁺ ; (+) NO ₃	non mesurées
Brotonne	(+) H ⁺ ; (-) NH ₄	non mesurées
La Crouzille	(-) NH ₄	non mesurées
La Hague	(-) NH ₄ ; (-) NO ₃	non mesurées
Peyrusse Vielle	série trop courte	non mesurées
CHP 40	non mesurées	
CHP 59	série trop courte	(-) Ca
CHS 35		(-) H ⁺
CHS 41	non mesurées	(-) Ca ; (-) NH ₄ ; (-) N
CPS 77		(-) Ca
DOU 71	série trop courte	
EPC 08	non mesurées	
EPC 63	série trop courte	(-) K
EPC 74	non mesurées	(-) Mg ; (-) SO ₄
EPC 87	non mesurées	(-) H ⁺ ; (-) NO ₃
CHA 67a	non mesurées	série trop courte
HET 30	non mesurées	
HET 54a	non mesurées	
HET 64	non mesurées	(-) NO ₃ ; (-) SO ₄
PL 20	série trop courte	
PM 17	non mesurées	
PM 40c		(-) SO ₄
PM 72	non mesurées	(-) K
PM 85	non mesurées	(-) Ca ; (-) NO ₃ ; (-) SO ₄
PS 44	non mesurées	
PS 67a	non mesurées	(-) K ; (-) NH ₄ ; (-) NO ₃ ; (-) N ; (-) SO ₄
PS 76	non mesurées	
SP 05	non mesurées	(-) Ca
SP 11	non mesurées	(-) SO ₄
SP 25	(+) Cl, (+) Na, (-) NH ₄	(-) NH ₄ ; (-) N ; (-) SO ₄
SP 38	non mesurées	(-) K
SP 57	non mesurées	
SP 68	non mesurées	



5

Comparaison
avec des mesures
équivalentes
réalisées en Europe

Comparaison avec des mesures équivalentes réalisées en Europe

Des mesures de retombées humides (*stricto sensu*) sont réalisées dans la plupart des pays européens. Grâce au programme EMEP, qui centralise une grande partie de ces données, il est possible de comparer les résultats français avec ceux des autres pays (tableau 12a). Toutefois, le nombre de stations par pays pour lesquelles nous avons obtenu des informations est limité (à l'exception de l'Autriche). Le nombre de stations est de 18 pour la France contre 31 pour l'Autriche et de 2 à 8 pour les autres pays.

La tentative de comparaison est donc réalisée à un niveau très général et rend compte plutôt de la tendance pluriannuelle des apports que du niveau des dépôts annuels. De plus, la simple comparaison de gammes de dépôts n'apporterait aucune information sur leur effet local en fonction de la richesse des sols et de l'utilisation des terres.

Les maxima français se trouvent souvent être les plus élevés. Seuls les maxima autrichiens les dépassent, à l'exception des chlorures et du sodium. La probabilité de rencontrer des valeurs élevées des dépôts augmente avec le nombre de stations, du fait de la difficulté de trouver des sites représentatifs d'une grande région pour positionner les stations de mesure, possibilité qui diminue avec le nombre de stations. Le nombre de stations prises en compte en Autriche, plus important qu'en France et que dans les autres pays, est donc probablement la raison du dépassement fréquent des maxima français par les résultats autrichiens et des maxima des autres pays par ceux de la France.

Tableau 12a : Comparaison des dépôts annuels de retombées humides (*stricto sensu*) mesurés en France entre 1993 et 1998 avec d'autres mesures réalisées en Europe.

Table 12a: Comparison of wet-only deposition, measured from 1993 to 1998 in France, with data from other European countries.

Retombées humides										
Pays & Nombre stations	H g/ha	Cl kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	N-NO ₃ kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha	source
France 18 moyenne	102	17	5,0	2,8	9,9	4,9	0,8	1,6	3,9	cette publication
1993-1998 médiane	96	9	4,6	2,8	4,9	4,2	0,6	1,0	3,2	
minimum	12	1	1,6	0,9	0,5	0,8	0,05	0,06	1,2	
maximum	268	114	10,8	6,4	65,0	13,6	3,7	10,2	11,9	
France 17 minimum	10	2,9	3,3	0,7	0,4	0,3	0,2	0,3	1,2	Ulrich et Williot (1993)
1966 - 1990 maximum	700	58,9	19,6	9,1	45,6	12,2	5,8	3,8	15,7	
Allemagne 8 minimum	66	2,3	2,4	2,2	1,4	2,7	0,4	0,2	1,5	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	219	68,7	7,3	6,1	36,6	6,9	1,7	4,5	4,7	
Autriche 31 minimum	10	0,6	1,2	0,8	0,2	0,9	0,1	0,02	1,1	Kalina et Puxbaum (1996a,b ; 1998)
1993 - 1995 maximum	700	53,2	15,3	9,0	8,4	13,9	8,9	12,3	43,9	
Danemark 3 minimum	57	11,2	2,4	1,6	6,0	1,3	0,4	0,7	0,7	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	201	42	6,2	3,8	25,0	3,2	1,2	3,0	1,9	
Espagne 6 minimum	0,8	4,7	4,0	1,6	2,3	—	—	0,6	—	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	105	298,3	40,3	5,7	13,3			24,1		
Finlande 4 minimum	100	0,9	1,1	0,7	0,6	0,4	0,3	0,08	0,2	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	205	33,5	5,0	3,2	18,2	2,5	1,5	2,3	1,8	
Grande Bretagne 5 minimum	46	18,1	1,9	0,6	9,7	0,6	0,4	1,4	1,0	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	248	56,2	6,3	3,1	31,4	3,6	1,5	2,9	4,9	
Italie 2 minimum	320	4,6	8,1	3,5	2,5	8,7	0,9	0,6	3,5	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum		20,2	8,7	6,7	10,4		4,9	2,0		
Luxembourg 1 minimum	75	5	4	2,7	2,7	3,6	0,9	0,2	2,9	communication personnelle
1995 - 1997 maximum	130	8,9	5,8	3,6	4,6	5,1	1,6	0,6	3,2	
Norvège 6 minimum	20	1,4	0,4	0,2	0,7	0,3	0,4	0,1	0,2	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	396	112,5	10,0	6,2	59,8	6,1	5,2	6,8	4,3	
Portugal 3 minimum	37	3,2	2,1	1,0	1,8	0,6	0,9	0,5	2,6	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	132	72,9	7,9	2,3	4,3	2,0	2,0	5,1	6,1	
Suède 4 minimum	46	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0,2	0,1	0,3	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	192	15,8	5,1	4,1	9,8	4,9	1,1	1,3	1,6	
Suisse 4 minimum	75	1,2	2,4	1,8	0,8	2,7	0,3	0,2	1,6	Hjellbrekke (1999)
1997 maximum	113	1,9	3,5	3,2	1,2	4,8	0,5	0,3	1,9	

Retombées totales											
Pays & Nombres stations		H g/ha	Cl kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	N-NO ₃ kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha	source
France	27 moyenne	114	21,1	6,7	3,5	12,2	5,0	1,6	1,7	6,3	cette publication
1993 - 1998	médiane	105	11,9	6,1	3,3	7,1	4,7	1,4	1,0	4,8	
	minimum	6	2,7	2,9	1,6	1,2	0,9	0,3	0,1	2,0	
	maximum	611	112,7	24,1	10,7	64,0	14,1	5,2	8,2	27,1	
France	56 minimum	10	5,5	5,3	1,9	3,2	0,3	0,7	0,3	2,2	Ulrich et
1966 - 1990	maximum	500	436	47,5	25,9	137	43,6	39,1	30,2	47	Williot (1993)
Allemagne	66 minimum	—	—	4,2	2,3	—	2,6	—	—	—	Haußmann et Lux (1997)
1995	maximum			20,0	10,3		13,9				
Autriche	20 moyenne	140	9,5	5,4	3,4	11,2	5,1	6,1	3,2	7,9	Smidt (1999)
1996 - 1998											
Belgique	2 minimum	20	30,5	16,6	5,1	11	3,8	13,8	1,7	11,6	Unité des
Wallonie	maximum	50	41,2	33,7	5,7	20,9	6,9	18,9	2,3	22,7	Eaux et Forêts (1998)
1997											
Luxembourg	1 minimum	84	7,9	5,3	3,7	4,3	4,2	1,4	0,5	5,3	communication
1994 - 1997	maximum	115	13,1	7,7	4,4	7,7	6,4	3,8	0,8	6,4	personnelle
Norvège	20 minimum	37	1	13	0,4	0,6	0,3	0,9	0,1	0,3	Aamlid
1992 - 1993	maximum	712	183,7	17,1	8,7	105,9	7,2	5,1	11,5	3,9	(1993,1994)
Suède (Sud)	68 minimum	160	5	—	2,4	1,8	2,1	0,7	0,3	0,8	Hallgren-
1985 - 1995	maximum	540	46		7,6	17,8	7,9	3	2,1	3,6	Larsson <i>et al.</i> (1997)

Tableau 12b : Comparaison des dépôts annuels de retombées totales mesurés en France entre 1993 et 1998 avec d'autres mesures réalisées en Europe.

Table 12b: Comparison of annual bulk deposition, measured from 1993 to 1998 in France, with data from other European countries.

Le nombre de stations de mesure de retombées totales dans les autres pays européens (tableau 12b) est plus important que celui pour les retombées humides (*stricto sensu*). L'accès à leurs données est par contre difficile en raison du peu de publications régulières au niveau national dans bon nombre de ces pays, d'où une comparaison qui reste très partielle. La gamme des valeurs françaises pour les différents ions est comparable à celle des autres pays, voire parfois inférieure à celle de la Wallonie (soufre et potassium) et de la Norvège (protons, chlorure, sodium et magnésium).



6

Comparaison
des retombées humides
(stricto sensu)
avec le modèle EMEP



6

Comparaison des retombées humides (stricto sensu) avec le modèle EMEP

Les dernières estimations des dépôts humides *stricto sensu* faites au niveau européen à l'aide du modèle EMEP (voir chapitre 2) concernent l'année 1995 (Berge, 1997). Les résultats pour la France sont reproduits sur la figure 14.

On constate pour le sulfate (SO_4) deux zones de dépôts distinctes (figure 14) :

1. le Nord du pays, caractérisé par une gamme de 10 à 20 kg/ha/an en soufre ;
2. le reste du pays, caractérisé par une gamme allant de 4 à 10 kg/ha/an en soufre.

La comparaison avec les valeurs mesurées montre pour la zone Nord des dépôts calculés plus importants que ceux mesurés en 1995 aux sites de La Hague, Brotonne, CHP 59, Revin et Donon. Dans la deuxième zone, toutes les valeurs mesurées se trouvent au-dessous du maximum de la gamme calculée, trois stations montrant même des valeurs au-dessous du minimum : Le Casset, La Crouzille et Iraty, avec respectivement 2 ; 2,2 et 3 kg/ha/an.

Pour le nitrate (NO_3) on peut distinguer également deux zones : la première dans le Nord et l'Est avec un dépôt modélisé de 4 à 10 kg/ha/an en azote, et la deuxième dans l'Ouest (excepté le Nord-Ouest) et le Sud avec un dépôt modélisé de 2 à 4 kg/ha/an en azote (figure 14). On dispose de valeurs de dépôt pour l'année 1995 pour 10 des 11 stations situées dans la première zone. Parmi ces dix stations, une seule se trouve dans la gamme de dépôt modélisée (Donon, avec 6,4 kg/ha/an), les autres stations étant soit au-dessous de cette gamme, soit se trouvant à la limite basse (CHP 59 et Revin, avec 4,1 kg/ha/an). Sur les sept stations se trouvant dans la deuxième zone, cinq d'entre elles ont fourni des valeurs de dépôts en 1995. Deux stations correspondent à la gamme modélisée (Peyrusse Vieille et PM 40 avec 2,4 et 2,1 kg/ha/an respectivement), deux stations se trouvent au-dessous de la gamme (La Crouzille et Iraty avec 1,3 et 1,5 kg/ha/an respectivement), et une se trouve à la limite haute (PL 20).

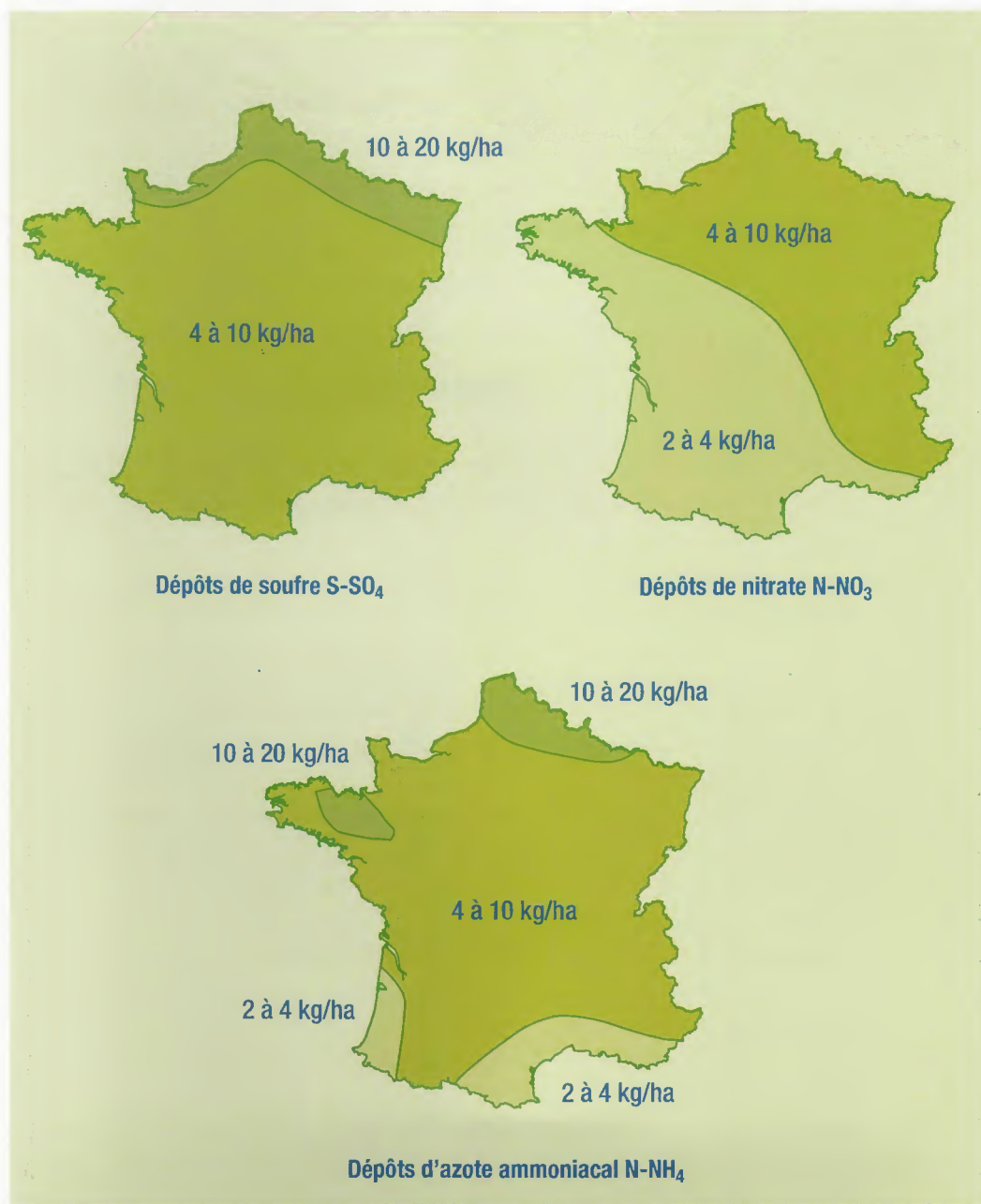


Figure 14 : Résultat de la modélisation des retombées humides (*stricto sensu*) pour l'année 1995 à l'aide du modèle EMEP pour le SO₄, le NO₃ et le NH₄ (d'après Berge, 1997). Les valeurs sont en kg/ha/an.

Figure 14: Results of the EMEP modelisation of wet-only deposition in 1995 for S-SO₄, N-NO₃ et N-NH₄ (Berge, 1997). Values are in kg/ha/year.

La modélisation pour l'ammonium conduit à distinguer cinq grandes zones en 1995 (figure 14c) :

- Zone 1 : le Nord avec 10 à 20 kg/ha/an ;
- Zone 2 : l'Est de la Bretagne avec 10 à 20 kg/ha/an de N-NH₄ ;
- Zone 3 : le Sud-Ouest avec 2 à 4 kg/ha/an ;
- Zone 4 : le Sud-Est avec 2 à 4 kg/ha/an de N-NH₄ ;
- Zone 5 : le reste du pays, qui représente la grande majorité de la métropole, avec 4 à 10 kg/ha/an de N-NH₄.

Dans les zones 1 et 2, on trouve respectivement les stations CHP 59 et Revin avec 6,5 et 7,9 kg/ha et la station CHS 35 près de Rennes avec 4,1 kg/ha, soit des valeurs bien au-dessous de la gamme modélisée (10 à 20 kg/ha/an). Il est probable qu'un site de mesure dans la clairière d'une forêt ne soit pas représentatif du reste de la région dans laquelle porcheries et élevages de volailles alternent avec champs, prés et vergers à pommes. De plus, l'azote ammoniacal est connu pour se déposer relativement vite, donc à proximité de son lieu d'émission. Dans la zone 3 se trouve la station Iraty, avec 4,1 kg/ha d'azote ammoniacal en 1995, ce qui correspond au maximum modélisé dans cette zone. La seule station située dans la zone 4 se trouve en Corse (PL 20), avec 3,6 kg/ha de N-NH₄ en 1995, valeur située en haut de la gamme modélisée dans cette zone. Enfin, la plupart des stations sont situées dans la zone 5, la plus grande en superficie. Parmi les onze sites pour lesquels on possède des valeurs de dépôt mesurés en 1995, huit sites ont des valeurs en accord avec la gamme modélisée (4 à 10 kg/ha/an de N-NH₄), un seul (Donon) dépasse la gamme avec 11,7 kg/ha en 1995 et deux se trouvent au-dessous de celle-ci (Le Casset et PM 40).

Il semble donc qu'en ce qui concerne la France, le modèle EMEP surestime en général les retombées humides (*stricto sensu*) réelles pour le sulfate et le nitrate. En ce qui concerne l'ammonium, les résultats de simulation paraissent plus réalistes dans la zone correspondant à la gamme des retombées moyennes, qui couvre la plus grande partie du pays, que dans les zones de très faibles ou très fortes retombées.

Il est important de rappeler ici que les calculs du modèle EMEP et les mesures des retombées atmosphériques présentées dans cet ouvrage concernent uniquement des dépôts hors couvert forestier. Or les charges critiques sont calculées pour les dépôts sous le couvert forestier, c'est-à-dire prenant également en compte les dépôts secs sur les cimes des arbres. Faute d'un savoir-faire au niveau national, le calcul de ces dépôts sous forêt n'est actuellement pas disponible pour le territoire français.



7

Conclusions



7

Conclusions

Bien que les objectifs des réseaux MERA et CATAENAT diffèrent, les mesures des retombées atmosphériques humides traitées dans ce document témoignent d'une bonne complémentarité et d'une cohérence des données collectées attribuables d'une part à l'application d'un programme d'assurance qualité strict et identique (à l'exception de ce qui concerne la logistique de terrain), et d'autre part aux performances du laboratoire d'analyses (Wolff Environnement pour les deux réseaux). Sous réserve de maintenir ce niveau de qualité, ces deux réseaux seront en mesure de fournir dans l'avenir des informations pertinentes aussi bien sur les variations spatiales et temporelles que sur les tendances qualitatives et quantitatives à moyen et long terme des retombées atmosphériques.

Les différents régimes météorologiques affectant le territoire français sont parfaitement identifiés et ont été clairement associés à la composition chimique des précipitations. Chacun de ces régimes génère majoritairement des apports d'éléments qui sont d'origine acide, marine ou encore terrestre. Un gradient spatial positif orienté d'Ouest en Est est observé sur le territoire français en ce qui concerne l'acidité des précipitations. La pluviométrie de ces régions du quart Nord-Est étant également parmi la plus élevée du territoire, elle génère des dépôts importants en composés acidifiants (Dambrine *et al.*, 1995, Probst *et al.*, 1992, 1995).

Les premiers résultats établis pour les années 1993 à 1998 montrent, pour certains sites, des amorces de tendances à la baisse des concentrations en éléments chimiques dans les eaux de précipitation, notamment en ce qui concerne les composés soufrés (environ 15 %) et l'ammonium. Cette diminution des teneurs en soufre atmosphérique pourra être attribuée, si elle se confirme, aux efforts de réduction des émissions des pays industrialisés. Une baisse similaire est observée dans l'Est de la France pour le dépôt total de H^+ et SO_4 entre 1985 et 1992 (Probst *et al.*, 1995) ainsi que dans de nombreux pays européens. Ainsi une diminution des concentrations et dépôts de sulfates dans les eaux de pluie a été observée entre 1984 et 1993 en Autriche (Puxbaum *et al.*, 1998, 33 %, confirmé par Smidt *et al.*, 1999), en Espagne (Avila, 1996, 19 % de réduction de sulfates), aux Pays-Bas (Erisman *et al.*, 1989, 19 % de réduction des dépôts de sulfates) et au Danemark (Hovmand et Kemp, 1996, 50 à 70 % de réduction des dépôts humides de sulfates). Ces diminutions sont observées également aux États-Unis comme l'ont montré récemment Holland *et al.* (1999) en comparant les concentrations de nitrate et sulfate particulières entre 1989 et 1995 pour 34 stations de mesures ; une diminution significative de 26 % des teneurs

en sulfates et nitrates ayant été observée sur respectivement 31 et 16 sites. Des diminutions significatives des concentrations en sulfates ont également été signalées dans deux autres études également réalisées aux États-Unis concernant les retombées humides *stricto sensu* de 1980 à 1995 (Shannon, 1999) et les retombées totales de 1984 à 1996 (Clow et Mast, 1999).

A contrario de ce qui est observé pour le soufre, l'amorce de diminution des concentrations d'ammonium observées entre 1993 et 1998 dans les retombées humides en France ne semble pas être constatée dans d'autres pays européens, aucune variation significative à la hausse ou à la baisse n'étant signalée en dehors de nos frontières. En ce qui concerne les concentrations et les dépôts d'ions nitrates, aucune variation temporelle n'est observée. Les concentrations ou dépôts annuels des autres espèces semblent quant à eux fortement dépendants des fluctuations météorologiques annuelles, et notamment du régime océanique.

Enfin, des interrogations demeurent quant à la validité des résultats issus du modèle EMEP concernant la situation française. Des écarts d'ordre quantitatif ont en effet été constatés pour certaines espèces chimiques, mais aussi d'ordre qualitatif concernant leur répartition spatiale.



Perspectives

La complémentarité et la spécificité des réseaux MERA et CATAENAT permettent de disposer d'une base de données relativement dense et de bonne qualité. La continuité de l'alimentation de cette base de données devrait permettre de mieux appréhender le problème des retombées atmosphériques tout d'abord en répondant aux exigences européennes par le calcul de charges critiques et de leurs dépassements, mais aussi par la détermination des apports externes au cycle nutritif des différents écosystèmes, ou encore par l'étude du transport de ces polluants et de l'identification des sources à l'origine de leurs retombées.

Charges critiques

La notion de charges critiques, relative aux dépôts atmosphériques auxquels sont exposés les écosystèmes terrestres et aquatiques, est utilisée depuis quelques années au niveau international comme un concept permettant de définir des stratégies de contrôle de la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Ce concept peut être appliqué à tout récepteur de la pollution atmosphérique et peut porter sur tous types de polluants comme les espèces soufrées ou azotées mais également les dépôts acides, l'ozone ou encore les éléments traces métalliques et les polluants organiques persistants. S'agissant des dépôts atmosphériques acides, deux effets sont à considérer : l'acidification et l'eutrophisation, pouvant affecter chacun des récepteurs comme les eaux superficielles, les eaux souterraines, les sols et les arbres forestiers, les cultures agricoles ou encore la végétation herbacée.

Les résultats de mesures des réseaux MERA et CATAENAT décrits dans ce document concernent uniquement les retombées hors couvert forestier. La collecte sous couvert forestier aboutirait à des précipitations bien plus chargées en espèces ioniques que celles collectées hors couvert, le feuillage constituant un filtre très efficace pour les gaz et particules. À l'heure actuelle, aucun modèle ne permet *a priori* de calculer les retombées sous couvert à partir de celles mesurées hors couvert forestier. Les modèles de Hettelingh *et al.* (1991) permettent quant à eux de calculer les charges critiques sur des unités de surface de 150 x 150 km, et plus récemment de 50 x 50 km (Jonson *et al.*, 1998) ; or les conditions écologiques, notamment la variabilité des types de sol, nécessitent une approche beaucoup plus fine au-dessous du km². Les travaux préliminaires réalisés dans ce sens par

Party (1999) et Party *et al.* (1999) peuvent certainement être adoptés en tant que référence en France, même si des améliorations devront être apportées par le biais d'une prise en compte de données plus détaillées.

Des cartes de charges critiques ont été établies pour la France par Hettelingh *et al.* (1991) et Party (1999), et peuvent dans un premier temps être comparées aux mesures obtenues par les réseaux MERA et CATAENAT.

Une gamme de charges critiques en acidité de 0,2 à plus de 2 kéq/ha/an [8] a ainsi été estimée par Hettelingh *et al.* (1991) et Party (1999), tandis que les retombées humides et totales en acidité mesurées entre 1993 et 1998 oscillent entre 0,006 et 0,6 kéq/ha/an. Par comparaison aux mesures sous couvert forestier, Ulrich et Lanier (communication personnelle) ont fait une première estimation des retombées totales d'acidité pour 27 peuplements composés de huit essences forestières dont les valeurs oscilleraient entre 0,05 et 4 kéq/ha/an, dépassant ainsi pour plusieurs sites les charges critiques d'acidité.

Pour les sulfates, Hettelingh *et al.* (1991) estiment des charges critiques de 0,2 à 1 kéq/ha/an de soufre sur la majeure partie du territoire français. Les retombées humides et totales mesurées par les réseaux MERA et CATAENAT varient de 0,1 à 1,5 kéq/ha/an, dépassant par conséquent dans certains cas les valeurs de Hettelingh *et al.* (1991). Les mesures réalisées par Ulrich et Lanier (communication personnelle) sur 27 sites sous couvert forestier présentent quant à elles des dépôts variant de 0,2 à 2,9 kéq/ha/an en soufre. Enfin, les charges critiques d'azote minéral total (nitrates, NO_3 , ammonium et NH_4) se situent d'après Hettelingh entre 0,2 et 2 kéq/ha/an d'azote. Les dépôts de ces mêmes espèces mesurés au sein des réseaux MERA et CATAENAT entre 1993 et 1998 oscillent entre 0,1 et 1,6 kéq/ha/an.

Cumul pluriannuel des retombées sur les écosystèmes

En plus de leur intérêt dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air, les mesures des retombées ont également une importance dans le calcul des cumuls pluriannuels permettant de mieux estimer les entrées externes réelles dans les cycles minéraux des

écosystèmes. Pour ce faire, il est nécessaire que ces mesures durent suffisamment longtemps pour couvrir le cycle moyen d'un peuplement forestier, typiquement 40 à 100 ans. La variabilité inter-annuelle très forte des retombées ne facilite pas l'utilisation de moyennes pluriannuelles : l'extrapolation devient hasardeuse, même si les retombées suivent une tendance marquée. Il est donc également d'un grand intérêt que ces mesures soient poursuivies afin d'améliorer les modèles de bilans minéraux d'écosystèmes entiers, en les basant davantage sur des mesures réelles que sur des hypothèses, l'intérêt de ces modèles étant d'affiner le calcul des charges critiques.

Étude du transport des polluants, identification des sources d'émissions

L'installation de réseaux de surveillance des retombées atmosphériques, dans le cadre de la convention de Genève sur le suivi de la pollution transfrontalière, a pour but d'étudier les flux de polluants à l'échelle continentale. Les modèles utilisés jusqu'à présent établissent des cartes de dépôts de polluants et tentent d'estimer les contributions de chaque pays aux retombées polluantes observées dans les pays voisins. À l'échelle du territoire français, la variabilité des types de climats rencontrés fait que les sites de mesures ne sont pas soumis aux mêmes influences. Il apparaît donc intéressant d'identifier géographiquement les sources de polluants à l'origine par exemple de l'acidité des précipitations, des apports en calcium ou magnésium ou encore des apports azotés. Un modèle récepteur orienté, tel que celui décrit par Plaisance *et al.* (1996ab) et Charron *et al.* (1998), permet de caractériser ces sources polluantes. La comparaison des résultats de simulation ainsi obtenus aux cartes des émissions européennes a notamment permis de valider ce type de modèle dans le cadre d'études menées dans le Morvan, non seulement pour les précipitations, mais également pour les espèces soufrées gazeuses et particulaires (Charron *et al.*, 1999, 2000ab). Ces études pourront être étendues à d'autres sites de mesures caractérisés par une climatologie différente.



Bibliographie



Bibliographie

- Aamlid D., *Forurensninger i skog. Analyser av nedbør på intensivt overvåkede forskningsflater i 1992* (Pollution in forests. Analysis of precipitation at intensively monitored research plots in Norway in 1992). Rapp. Skogforsk, 23/93 : 1-27, (1993).
- Aamlid D., *Forurensninger i skog. Analyser av nedbør på intensivt overvåkede forskningsflater i 1993* (Pollution in forests. Analysis of precipitation at intensively monitored research plots in Norway in 1993). Rapp. Skogforsk, 19/94 : 1-21, (1994).
- ADEME Éditions, *La qualité de l'air en France en 1995-96, données et références*, 268 p., (1998).
- Avila, A, *Time trends in the precipitation chemistry at a mountain site in northeastern Spain for the period 1983-1994*, Atmospheric Environment, 30(9) : 1363-1373, (1996).
- Barrett K. and Sandnes H., 1996, *Transboundary acidifying air pollution*. Calculated transport and exchange across Europe, 1985-1995. In : Transboundary Air pollution in Europe. MSC-W Status report 1996, Barrett K. and Berge E. (Eds). EMEP/MSC-W. Report 1/96, Norwegian Institute , Oslo, Norway, 182 p., (1997).
- Berge E., *Transboundary Air Pollution in Europe*. MSC-W Status Report 1997. Part 1 and 2. EMEP/MSC-W Report 1/97, research report n°48. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, (1997).
- *Cahier des spécifications techniques*, Pluviomètre 400 cm², modèle SPIEA modifié MN, R01.2050A, Direction de la Météorologie, Centre Technique et du Matériel, Division Technique, (1980).
- Charron A., Plaisance H., Sauvage S., Coddeville P., Galloo J. C., Guillermo R., *Intercomparison between three receptor-oriented models applied to acidic species in precipitation*. The Science of The Total Environment, 223 : p. 53-63, (1998).
- Charron A., Plaisance H., Sauvage S., Coddeville P., Galloo J. C., Guillermo R., *A receptor-oriented model to establish source-receptor relationships for acidic species in precipitation in Morvan, France*, Proceedings of EUROTRAC Symposium '98 : 8-38, (1999).
- Charron A., Plaisance H., Sauvage S., Coddeville P., Galloo J. C., Guillermo R., *A study of the source-receptor relationships influencing the acidity of precipitation collected at a rural site in France*, Atmospheric Environment, 34 : 3665-3674. (2000a).

- Charron A., Plaisance H., Sauvage S., Coddeville P., Galloo J. C., Guillermo R., *Seasonal source-receptor relationships for SO₂, particulate SO₄²⁻ and wet SO₄²⁻ measured at Morvan, France*, Environmental Science and Technology, in print, (2000b).
- Clow D. W. and Mast M. A., *Long-term trends in streamwater and precipitation chemistry at five headwater basins in the northeastern United States*. Water Resources Research, 35, 2 : 541-554, (1999).
- Coddeville P. et Guillermo R., *Les retombées atmosphériques en France, réseau MERA 1990*. École des Mines de Douai Éd., 71 p. + annexes, (1993).
- Croisé L., Ulrich E., Duplat P., Jaquet O., *RENECOFOR, Deux approches indépendantes pour l'estimation et la cartographie des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français*. Éd. Office National des Forêts, Département Recherche et Développement, ISBN 2-84207-258-8, 102 p., (2002).
- Dambrine E., Ulrich E., Cenac P., Durand P., Gauquelin T., Mirabel P. Nys C., Probst A., Ranger J., Zephoris M., *Atmospheric deposition in France and possible relation with forest decline*. In : Landmann G., Bonneau M., (eds), *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains*. Springer Ed., Berlin, Heidelberg, New York : 177-199, (1995).
- Dambrine E., Thomas A. L., Party J. P., Probst A., Boudot J. P., Duc M., Dupouey J. L., Gégout J. C., Guérol F., King D., Maitat O., Nicolai M., Pollier B., Thimonier A., *Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges géseuses : distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences*. C. R. Acad. Agric. Fr., 84, 5 : 75-94, (1998).
- EMEP/MSW, *Transboundary Air Pollution in Europe*, Part 1 and Part 2. MSW status report to emissions, dispersion and trends of acidifying and eutrophying agents. Report 1/97, 108 p, (1997).
- ENGREF, *Les recherches en France sur le dépérissement des forêts, Programme DEFORPA*, 2^e rapport, Nancy, ISBN 2-85710-027-2, 131 p, (1991).
- Erisman J. W., de Leeuw F. and Van Aalst R. M., *Deposition of the most acidifying components in the Netherlands during the period 1980-1986*. Atmospheric Environment, 23 : 1051-1062, (1989).
- Février C., Party J.-P. et Probst A., *Acidité des eaux de surface et charges critiques dans le massif des Ardennes françaises*. C. R. Acad. Sci., Paris, 328 : 29-35, (1999).
- Fillion N., Probst A., and Probst J. L., *Natural organic matter contribution to throughfall acidity in french forests*. Environment International, 24, 5-6 : 547-558, (1998).

- Fillion N., Probst A. and Probst J. L., *Dissolved organic matter contribution to rain water, throughfall and soil solution chemistry*. *Analusis*, 27, 5 : 409-413, (1999a).
- Fillion N., Probst A. and Probst J. L., *Determination of organic and mineral acidity contributions to the total throughfall acidity: application to French forests*. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 328 : 333-339, (1999b).
- Hallgren-Larsson E., Knulst J. C., Lövblad G., Malm G., Sjöberg K., Westling O., *Luftföroreningar i södra Sverige 1985-1995*. IVL-Rapport, Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning, Aneboda, B 1257, 142 p + annexes, (1997).
- Haußmann T., Lux W., *Dauerbeobachtungsflächen zur Umweltkontrolle im Wald - Level II, Erste Ergebnisse*. Bundesministerium für Ernährung Ed., Landwirtschaft und Forsten, Allemagne, 148 p., (1997)
- Hettelingh J.-P., Downing R. J. and de Smet P. A. M., *Mapping critical loads for Europe*. CCE technical report n°1, RIVM, National Institute of Public Health and Environmental Pollution, Bilthoven, Pays-Bas, ISBN 90-6960-011-0, 86 p. + annexes, (1991).
- Hjellbrekke A.-G., *EMEP - Cooperative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe*. Data Report 1997, Part 1 : annual summaries. NILU/EMEP/CCC-Report 3/99, O-7727, 85 p., (1999).
- Holland D. M., Principe P. P. and Sickles J. E., *Trends in atmospheric sulfur and nitrogen species in the eastern United States for 1989-1995*. *Atmospheric Environment*, 33 : 37-49, (1999).
- Hovmand M. F. and Kemp K., *Downwards trends of sulphur deposition to a Danish spruce forest*. *Atmospheric Environment*, 30 : 2989-2999, (1996).
- Jonson J. E., Bartnicki J., Olendrzynski K., Jakobsen A., and Berge E., *EMEP Eulerian model for atmospheric transport and deposition of nitrogen species over Europe*. *Environmental Pollution*, 102, S1 : 289-298, (1998).
- Kalina M. und Puxbaum H., *Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich*. Dokumentation der Daten für 1993. Technische Universität Wien, Institut für Analytische Chemie, Bericht 2/96, (1996).
- Kalina M. und Puxbaum H., *Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich*. Dokumentation der Daten für 1994. Technische Universität Wien, Institut für Analytische Chemie, Bericht 5/96, (1996).

- Kalina M. und Puxbaum H., *Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich*. Dokumentation der Daten für 1995. Technische Universität Wien, Institut für Analytische Chemie, Bericht 1/98, (1998).
- *Le petit Larousse*, Dictionnaire encyclopédique, grand format. Larousse Éd., 1 872 p., (1995).
- Lojze-Pilot M. D., Martin J. M. and Morelli J., *Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean*. Nature, 321, 6068 : 427-428, (1986).
- Massabuau J. C., Probst A. and Guerold F., *Critical loads of acidity to streamwaters in the Vosges mountains (France): Biological criteria*. In : Landmann G., Bonneau M., (eds), Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains. Springer Ed., Berlin, Heidelberg, New York : 387-393, (1995).
- Nilsson J. and Greenfelt P., (Eds.), *Critical loads for sulphur and nitrogen, Report from a workshop held at Skaklaster, 19-24 March 1988*. Nordic Council of Ministers, Miljö-rapport, Copenhagen, (1988).
- ONF, Département des Recherches Techniques, *Notice de présentation du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers*, ISBN 2-84207-021-6, 38 p., (1996).
- Party J.P., *Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Taux d'altération sur petits bassins-versants silicatés. Application au calcul des charges critiques d'acidité*. Thèse de Doctorat. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 249 p., (1999).
- Party J. P., Probst A., Dambrine E. and Thomas A. L., *Critical loads of acidity to France : sensitivity areas in the north-eastern France*. Water, Air and Soil Pollution, 85, 1-4 : 2407-2412, (1995).
- Party J. P., Probst A., Fevrier C, Dambrine E., King D. et Thomas A. L., *Les charges critiques en France. Impacts et conséquences à long terme des polluants atmosphériques sur les écosystèmes « naturels » terrestres et aquatiques*. Données et références. ADEME Éd., ISBN 2-86817-194-6, 1997, 59 p., (1997).
- Party J.-P., Probst A., Thomas A. L. et Dambrine E., *Charges critiques en polluants atmosphériques en France : écosystèmes vulnérables, écosystèmes menacés*. Les Cahiers du D.S.F., 1-1999 (La Santé des Forêts [France] en 1998, Min. Agri Pêche (DERF), Paris : 80-85, (1999).

- Plaisance H., Coddeville P., Roussel I. and Guillermo R., *A qualitative determination of the source locations of precipitation constituents in Morvan, France*. Environmental Technology, 17, pp. 977-986, (1996a).
- Plaisance H., Coddeville P., Roussel I. and Guillermo R., *Spatial variability and source identification of rural precipitation chemistry in France*. The Science of the Total Environment, 180, pp 257-270, (1996b).
- Posch M. and De Smet P. A. M., *Calculation and mapping of critical thresholds in Europe*, Hettelingh J.P., Downing R.J. (Eds), CEE Status Report 1995. UN/ECE. Convention on long range transboundary air pollution. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, 197 p., (1995).
- Probst A., Fritz B. and Viville D., *Mid-term trends in acid precipitation, streamwater chemistry and element budgets in the Strengbach catchment (Vosges mountains, France)*. Water, Air and Soil Pollution, 79 : 39-59, (1995a).
- Probst A., Lelong F, Viville D., Durand P., Ambroise B. and Fritz B., *Comparative hydro-chemical behaviour and element budgets of the Aubure (Vosges Massif) and Mont-Lozère (Massif Central) spruce forested catchments*. In : Landmann G., Bonneau M., (eds), Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains. Springer Ed., Berlin, Heidelberg, New York : 203-225, (1995b).
- Probst A., Party J. P., Dambrine E., Février C., Thomas A. L., Stussi J. M. et King D., *Charges critiques d'acidité en France. L'acidification est-elle encore un problème majeur ?*, Journée d'Etudes du CITEPA, 9/12/97, Paris, 12 p., (1997).
- Probst A., Party J. P., Février C., Dambrine E., Thomas A. L. and Stussi J. M., *Evidence of springwater acidification in the Vosges mountains (North-East of France) : influence of bedrock buffering capacity*, WASP, 114 : 395-411, (1999).
- Probst A., Probst J. L., Massabuau J. C. and Fritz B., *Surface water acidification in the Vosges mountains: relation to bedrock and vegetation cover*. In : Landmann G., Bonneau M., (eds), Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains. Springer Ed., Berlin, Heidelberg, New York : 371-386, (1995).
- Probst A., Viville D., Fritz B., Ambroise B. and Dambrine E., *Hydrochemical budgets of a small granitic catchment: The Strengbach catchment case study (Vosges massif, France)*. Water, Air and Soil Pollution, 62 : 337-347, (1992).
- Puxbaum, H., Simeonov V., et al., *Ten years trends (1984-1993) in the precipitation chemistry in Central Austria*, Atmospheric Environment, 32(2) : 193-202, (1998).

- Shannon J. D., *Regional trends in wet deposition of sulfate in the United States and SO₂ emissions from 1980 through 1995*. Atmospheric Environment, 33, 5 : 807-816, (1999).
- Smidt S., ICP Forests Level II, *Ergebnisse der Depositionsmessungen 1996-1998*. Institut für Immissionsforschung und Forstchemie, Bericht ICP-DEP 3/1999 (en préparation), (1999).
- Smidt S., Block, J., Jandl R. und Gehrmann J., *Trends von Luftschadstoffkonzentrationen und depositionen an Waldmeßstationen in Österreich und Deutschland (Trends of pollutant concentrations and inputs at forest stations in Austria and Germany)*, soumis à Forstwissenschaftliches Centralblatt, (1999).
- Ulrich E. et Lanier M., *Manuel de référence n°3 pour le fonctionnement du sous-réseau CATAENAT (Charge Acide Totale d'origine Atmosphérique dans les Écosystèmes Naturels Terrestres)*. Office National des Forêts, document interne, 93 p., (1993).
- Ulrich E. et Lanier M., *RENECOFOR - Dépôts atmosphériques concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous-réseau CATAENAT) - Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996*. Éd. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-134-4, 135 p., (1998).
- Ulrich E. et Williot B., *Les dépôts atmosphériques en France de 1850 à 1990*. ADEME/ONF Éd, ISBN 2-90438-448-0, 154 p., (1993).
- Unité des Eaux et Forêts, *Installation de huit placettes permanentes de surveillance intensive d'écosystèmes forestiers en région wallonne*. Rapport final, Projet CE n° 9560BL0020, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, 56 p., (1998).

The background of the page is a solid green color. Overlaid on this are two large, organic, wavy shapes in a light blue color. One shape is in the upper right quadrant, and the other is in the lower left quadrant. They appear to be liquid or smoke-like forms. The word "Glossaire" is printed in a white, sans-serif font on the green background.

Glossaire



Glossaire

[1] Anion*

Ion chargé négativement (espèce qui a capté un ou plusieurs électrons).

[2] Cation*

Ion chargé positivement (espèce qui a perdu des électrons).

[3] Concentration

Elle représente la masse d'un corps dissoute dans l'unité de volume d'une solution d'eau de précipitation ou d'un autre gaz (ou mélange de gaz). L'unité utilisée est le microgramme par litre ou le milligramme par litre de solution ($\mu\text{g/L}$ ou mg/L).

[4] Concentration moyenne pondérée par la pluviosité

La moyenne arithmétique des concentrations mesurées pour l'ensemble des échantillons collectés sur un site pendant une période donnée peut être influencée par quelques valeurs extrêmes. Or le plus souvent, les fortes concentrations sont liées à de faibles volumes de pluies, correspondant par conséquent à un faible dépôt, tandis que les faibles concentrations sont liées à des quantités de pluies importantes conduisant à un dépôt important. Aussi, afin de tenir compte de cet effet de dilution, on utilise généralement la concentration moyenne pondérée par la pluviosité selon la formulation suivante :

$$CMP_p = \frac{\sum_i C_{ij} \times P_j}{\sum_j P_j}$$

avec CMP_p = concentration moyenne pondérée par la pluviosité pour la période p (mois, année, ...)

C_{ij} = concentration mesurée de l'espèce i pour la période j (jour, semaine)

P_j = pluviosité mesurée pour la période j

Ceci équivaut à rassembler tous les échantillons collectés pendant une période j donnée dans un seul récipient pour déterminer ensuite la concentration des différentes espèces présentes. Ce calcul de moyenne permet de comparer entre eux plusieurs sites dont la pluviosité diffère ou encore d'analyser les tendances à moyen ou long terme. Toutes les concentrations moyennes présentées dans ce document sont exprimées suivant ce mode de calcul.

[5] Dépôt humide ou dépôt *stricto sensu*

Masse d'une espèce chimique apportée par les précipitations (pluie ou neige) par unité de surface (hectare) et par unité de temps (année) ; l'unité utilisée est donc le kilogramme/hectare/an (kg/ha/an). Le système de collecte permet d'exclure les dépôts secs (poussières) qui ont souvent une origine locale ainsi que les dépôts occultes (givre, brouillard, ...). Les concentrations des différents éléments chimiques sont par conséquent représentatives du transport des polluants sur de moyennes ou longues distances. Le cumul annuel des espèces chimiques déposées par unité de surface est alors appelé dépôt humide ou dépôt *stricto sensu*, ou plus simplement encore dans ce rapport, dépôt annuel.

[6] Dépôt total

Masse annuelle d'une espèce chimique apportée par l'ensemble des formes de précipitation définies précédemment mais aussi par les poussières sédimentables sur un site donné par unité de surface (hectare) et par unité de temps ; l'unité utilisée est donc le kilogramme/hectare/an (kg/ha/an). La collecte s'effectue généralement dans des récipients, parfois appelés jauges, gardés constamment ouverts.

[7] Dépôt (mots équivalents utilisés) : retombées atmosphériques, apport au sol.

Remarque : Malgré les grandes précautions prises par les opérateurs sur le terrain et malgré l'utilisation de méthodes et dispositifs standardisés pour la collecte des précipitations, les calculs de dépôts sont souvent considérés comme une estimation. Il existera toujours une incertitude liée surtout à la variabilité spatiale de la pluviosité mais aussi sur des phénomènes comme l'évaporation d'eau sur les surfaces de réception lors de petites pluies ou les pertes occasionnées lors d'événements pluvieux de forte intensité. De plus, la quantité de pluie mesurée à 1 m de hauteur est légèrement sous-estimée par rapport à la « pluie au sol » ; les mesures sont donc comparables entre elles (station à station) mais elles sont sous-estimées par le seul fait du choix de la hauteur de collecteur. Les valeurs de dépôts sont donc le plus souvent des valeurs minimales.

[8] Équivalent

C'est l'unité permettant de comparer l'ensemble des ions par rapport à la même référence, indépendamment de leur poids moléculaire et de leur charge électrique principale. Par exemple, un proton (H^+) a le poids moléculaire relatif de 1 et il n'a qu'une seule charge positive. Le calcium a un poids moléculaire de 40 et deux charges positives. On calcule l'équivalent en divisant la concentration d'un ion, par exemple 2 mg/L de H^+ ou de Ca^{2+} , par son poids moléculaire et en multipliant ensuite par sa charge électrique : cela donne pour 2 mg/L de protons 2 équivalents/litre

(= $(2/1) \times 1$ charge) et pour 2 mg/L de calcium 0,1 équivalent/litre (= $(2/40) \times 2$ charges). Ceci montre que 2 mg/L de protons sont chimiquement beaucoup plus actifs que 2 mg/L de calcium.

[9] Ion

Atome ou molécule dont le nombre d'électrons est différent du nombre de protons et qui, de ce fait, possède une charge électrique positive ou négative.

[10] Jauge d'Owen

Récipient, généralement en polyéthylène, surmonté d'un entonnoir permettant la collecte des eaux de précipitation et des particules sédimentables. L'ensemble peut être placé dans un tube en PVC, afin de protéger l'échantillon de la radiation solaire directe.

[11] Lambert (projection*)

Représentation plane conique conforme directe d'une sphère ou d'un ellipsoïde, introduite par J.H. Lambert en 1772 et utilisée dans de nombreux pays pour le calcul des triangulations géodésiques et pour l'établissement des cartes topographiques.

[12] Pluviomètre

Instrument de la mesure de la pluviosité. La mesure peut se faire soit manuellement (plusieurs fois par jour, par semaine ou par mois) à l'aide d'un récipient, soit automatiquement et en temps réel.

[13] pH

Le pH est un indice exprimant la concentration en H^+ dans une solution. Il est la valeur négative de l'exposant exprimant la concentration en protons : $[pH = -\log [H^+]]$ ou $[H^+] = 10^{-pH}]$; un pH de 5,5 par exemple correspond à la concentration de $10^{-5,5}$ moles de H^+ par litre de solution. Une augmentation du pH correspond donc à une diminution de la concentration en H^+ , et vice versa. Cet indice caractérise l'acidité d'une solution.

[14] Précipitation*

D'après *Le Petit Larousse*, ce terme représente « toutes les formes variées sous lesquelles l'eau solide (neige, grêle) ou liquide (pluie, brouillard) contenue dans l'atmosphère se dépose à la surface du globe ». Les objectifs du réseau MERA étant d'étudier le transport des polluants sur de longues distances, il est nécessaire d'éviter tout phénomène localisé et par conséquent seules la pluie et la neige sont collectées.

[15] Proton*

Ici le terme proton désigne l'ion H^+ qui est constitué d'un atome d'hydrogène qui a perdu un électron. La concentration en ion H^+ d'une solution constitue l'acidité directe.

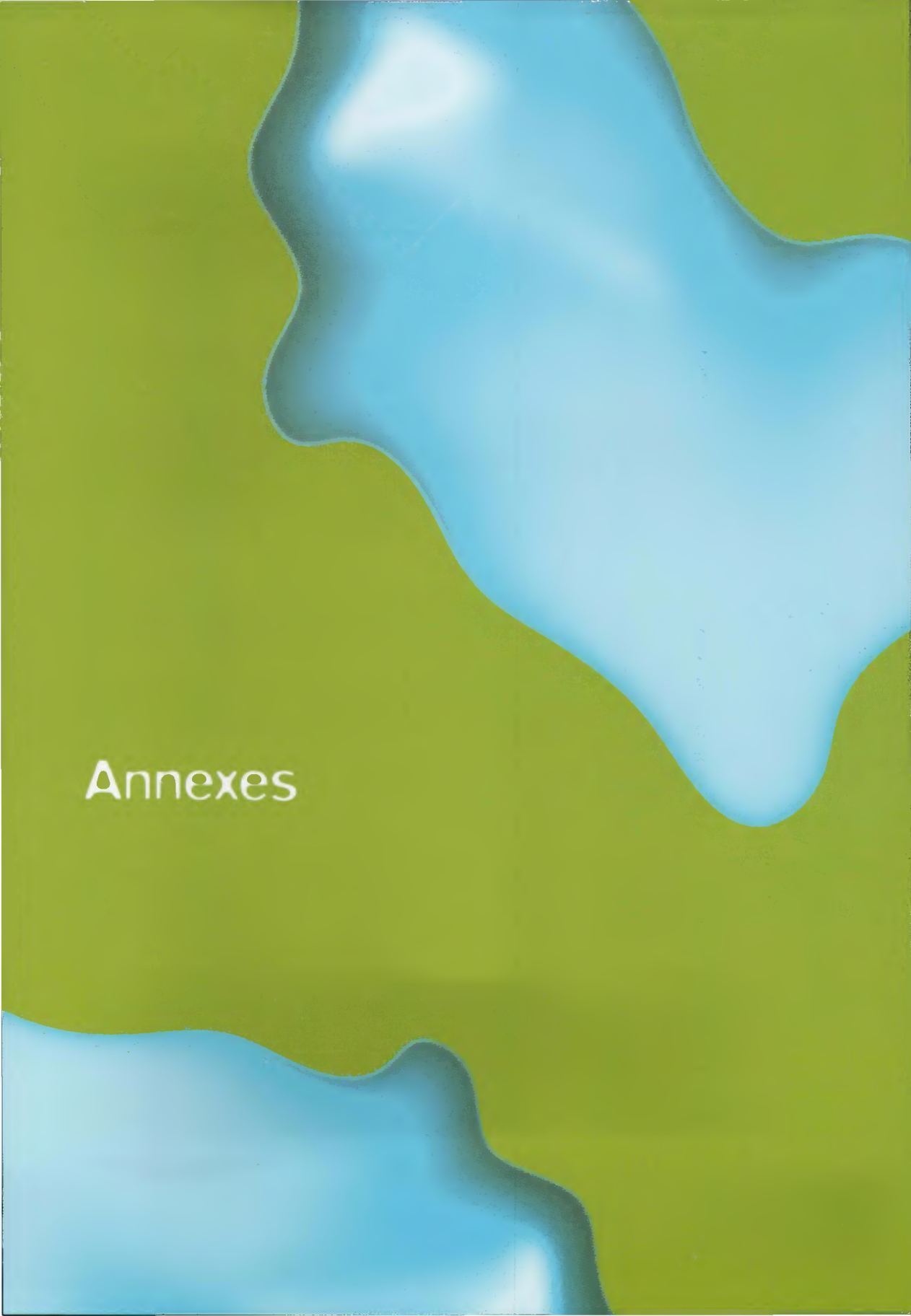
[16] Stomate

Ouverture microscopique des feuilles permettant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère lors de la transpiration ou la respiration.

[17] Totalisateur

Récipient, souvent de forme cylindrique et d'une hauteur dépassant 1 mètre, ouvert en haut, permettant de cumuler toutes les précipitations d'une période donnée, quelle que soit leur forme (solide ou liquide) et sans perte. Le changement du niveau d'eau à l'intérieur du récipient permet d'exprimer l'ensemble des précipitations (neige, grêle, givre, pluie) en équivalent de millimètre de pluie.

* selon *Le Petit Larousse*, 1995

The background of the page is a solid green color. Overlaid on this are two large, organic, wavy shapes in a light blue color. One shape is in the upper right quadrant, and the other is in the lower left quadrant. They appear to be liquid or cloud-like in form.

Annexes

Annexes

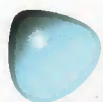
Annexe 1

Données de concentrations moyennes pondérées des précipitations *stricto sensu*
(réseaux MERA et CATAENAT)

Code Station	Réseau	Année	Pluie mm	pH	N-NO ₃ mg/L	S-SO ₄ mg/L	Cl mg/L	Na mg/L	N-NH ₄ mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L
BON	MERA	1993	1 848	5,35	0,25	0,39	0,37	0,21	0,68	0,04	0,06	0,45
BON	MERA	1994	1 786	5,21	0,24	0,36	0,36	0,22	0,53	0,05	0,06	0,56
BON	MERA	1995	2 377	5,29	0,20	0,28	0,27	0,15	0,40	0,04	0,12	0,22
BON	MERA	1996	1 517	4,97	0,26	0,34	0,31	0,18	0,34	0,04	0,08	0,40
BON	MERA	1997	1 671	5,13	0,20	0,28	0,35	0,20	0,25	0,05	0,06	0,31
BRO	MERA	1993	803	5,07	0,28	0,59	1,94	1,11	0,76	0,07	0,16	0,24
BRO	MERA	1994	922	5,14	0,26	0,57	1,76	1,01	0,90	0,08	0,19	0,36
BRO	MERA	1995	625	5,07	0,33	0,65	1,90	1,02	0,76	0,08	0,19	0,28
BRO	MERA	1996	513	4,75	0,37	0,67	2,18	1,26	0,57	0,08	0,21	0,33
BRO	MERA	1997	703	4,81	0,26	0,45	1,05	0,58	0,36	0,05	0,10	0,18
BRO	MERA	1998	958	4,91	0,27	0,57	2,52	1,44	0,42	0,10	0,20	0,29
CAS	MERA	1993	793	5,47	0,19	0,36	0,23	0,13	0,58	0,06	0,05	0,82
CAS	MERA	1994	783	5,31	0,20	0,33	0,18	0,11	0,34	0,08	0,04	0,69
CAS	MERA	1995	736	5,29	0,17	0,27	0,15	0,07	0,38	0,06	0,04	0,45
CAS	MERA	1996	561	4,84	0,25	0,39	0,25	0,10	0,27	0,22	0,04	0,68
CAS	MERA	1997	558	5,65	0,16	0,28	0,17	0,09	0,14	0,06	0,05	0,81
CAS	MERA	1998	600	5,44	0,20	0,31	0,20	0,11	0,19	0,09	0,06	0,71
CHP 59	CATAENAT	1995	965	4,75	0,43	0,68	1,49	0,70	0,68	0,05	0,10	0,23
CHP 59	CATAENAT	1996	806	4,71	0,42	0,69	1,12	0,74	0,69	0,08	0,06	0,28
CHP 59	CATAENAT	1997	896	4,90	0,32	0,46	0,96	0,55	0,48	0,08	0,07	0,19
CHP 59	CATAENAT	1998	988	4,86	0,40	0,59	1,25	0,71	0,60	0,05	0,09	0,22
CHS 35	CATAENAT	1993	820	5,29	0,22	0,50	2,33	1,29	0,53	0,05	0,18	0,20
CHS 35	CATAENAT	1994	1 012	5,44	0,22	0,44	1,57	0,92	0,57	0,18	0,28	0,49
CHS 35	CATAENAT	1995	865	5,29	0,22	0,39	1,82	0,92	0,48	0,06	0,15	0,25
CHS 35	CATAENAT	1996	665	5,49	0,18	0,36	1,93	1,09	0,42	0,07	0,19	0,34
CHS 35	CATAENAT	1997	716	5,47	0,27	0,39	1,66	0,92	0,46	0,09	0,14	0,24
CHS 35	CATAENAT	1998	1 043	5,57	0,17	0,33	1,69	0,96	0,41	0,05	0,14	0,17

Stations	Réseau	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
CPS 77	CATAENAT	1993	684	5,18	0,32	0,60	0,47	0,23	0,52	0,08	0,04	0,48
CPS 77	CATAENAT	1994	743	5,23	0,22	0,35	0,54	0,32	0,42	0,04	0,06	0,40
CPS 77	CATAENAT	1995	748	4,77	0,40	0,53	0,69	0,36	0,54	0,06	0,05	0,24
CPS 77	CATAENAT	1996	548	4,79	0,39	0,50	0,80	0,42	0,48	0,10	0,05	0,35
CPS 77	CATAENAT	1997	857	5,14	0,23	0,28	0,42	0,22	0,31	0,06	0,03	0,24
CPS 77	CATAENAT	1998	742	5,07	0,27	0,38	0,76	0,43	0,37	0,07	0,05	0,28
CRO	MERA	1993	1 284	5,36	0,29	0,52	0,78	0,41	0,81	0,07	0,10	0,37
CRO	MERA	1994	1 121	5,3	0,30	0,55	1,32	0,80	0,74	0,07	0,20	0,32
CRO	MERA	1995	649	5,39	0,20	0,34	0,86	0,46	0,53	0,04	0,09	0,21
CRO	MERA	1996	744	5,03	0,24	0,38	1,56	0,90	0,31	0,07	0,22	0,25
CRO	MERA	1997	859	5,18	0,25	0,39	1,21	0,77	0,34	0,09	0,17	0,24
CRO	MERA	1998	782	5,03	0,23	0,41	1,19	0,71	0,30	0,08	0,12	0,20
DON	MERA	1993	1 848	5,03	0,31	0,51	0,45	0,25	0,73	0,10	0,04	0,21
DON	MERA	1994	1 786	4,94	0,35	0,53	0,40	0,25	0,77	0,07	0,10	0,26
DON	MERA	1995	1 906	4,95	0,34	0,49	0,50	0,28	0,62	0,05	0,06	0,17
DON	MERA	1996	1 206	4,65	0,34	0,43	0,36	0,20	0,43	0,04	0,04	0,13
DON	MERA	1997	1 493	4,87	0,26	0,34	0,34	0,20	0,32	0,04	0,04	0,20
DON	MERA	1998	1 549	4,88	0,26	0,33	0,49	0,29	0,29	0,05	0,04	0,16
DOU 71	CATAENAT	1996	1 256	4,94	0,29	0,41	0,64	0,37	0,37	0,08	0,05	0,28
DOU 71	CATAENAT	1997	1 454	5,11	0,20	0,32	0,54	0,31	0,32	0,03	0,04	0,25
DOU 71	CATAENAT	1998	1 550	5,04	0,22	0,32	0,60	0,34	0,32	0,02	0,05	0,39
EPC 63	CATAENAT	1993	1 061	5,06	0,26	0,51	0,33	0,18	0,55	0,04	0,02	0,25
EPC 63	CATAENAT	1994	1 354	4,99	0,29	0,55	0,39	0,25	0,58	0,08	0,02	0,33
EPC 63	CATAENAT	1996	1 087	5,05	0,31	0,42	0,54	0,32	0,47	0,10	0,01	0,16
EPC 63	CATAENAT	1997	1 002	5,33	0,18	0,30	0,37	0,21	0,34	0,09	0,01	0,16
HAG	MERA	1993	830	5,26	0,50	1,03	11,77	6,74	1,00	0,51	0,80	0,57
HAG	MERA	1994	1043	5,27	0,35	0,95	13,02	7,44	0,61	0,36	1,06	0,68
HAG	MERA	1995	826	5,05	0,43	1,01	13,00	6,97	0,62	0,45	0,98	0,58
HAG	MERA	1996	847	4,65	0,41	0,88	8,21	4,88	0,38	0,19	0,65	0,37
HAG	MERA	1997	944	4,98	0,28	0,69	7,04	4,02	0,34	0,18	0,53	0,35
HAG	MERA	1998	1 061	4,96	0,30	0,85	10,78	6,25	0,37	0,26	0,79	0,43
IRA	MERA	1993	1 821	5,05	0,33	0,72	0,48	0,28	0,88	0,04	0,10	0,66
IRA	MERA	1994	1 194	5,30	0,22	0,46	0,54	0,36	0,59	0,07	0,10	0,66
IRA	MERA	1995	606	5,38	0,30	0,59	0,90	0,59	0,81	0,09	0,14	0,85
IRA	MERA	1996	1 421	5,04	0,29	0,51	0,81	0,51	0,35	0,04	0,12	0,73
IRA	MERA	1997	1 257	5,17	0,18	0,39	0,60	0,37	0,24	0,05	0,08	0,67
IRA	MERA	1998	1 449	5,12	0,20	0,40	1,14	0,71	0,35	0,10	0,12	0,41

Stations	Réseau	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
MOR	NERA	1993	1 444	5,32	0,27	0,45	0,74	0,43	0,98	0,06	0,12	0,30
MOR	NERA	1994	1 586	5,42	0,27	0,42	0,49	0,31	0,93	0,04	0,13	0,39
MOR	NERA	1995	1 608	5,26	0,26	0,39	0,59	0,29	0,63	0,07	0,10	0,22
MOR	NERA	1996	1 036	4,82	0,33	0,44	0,45	0,27	0,44	0,05	0,06	0,24
MOR	NERA	1997	1 201	5,12	0,19	0,30	0,55	0,33	0,27	0,08	0,06	0,19
MOR	NERA	1998	1 167	4,95	0,25	0,34	0,55	0,32	0,30	0,07	0,07	0,23
PEY	NERA	1995	873	5,18	0,28	0,54	1,37	0,79	0,63	0,07	0,13	0,43
PEY	NERA	1996	754	4,83	0,28	0,56	2,55	1,45	0,34	0,11	0,22	0,37
PEY	NERA	1997	964	5,09	0,19	0,44	1,05	0,62	0,25	0,08	0,10	0,41
PEY	NERA	1998	882	5,00	0,28	0,57	1,70	1,03	0,37	0,14	0,15	0,54
PL 20	CATAENAT	1994	1 425	5,01	0,19	0,53	3,82	2,29	0,13	0,11	0,31	0,51
PL 20	CATAENAT	1995	1 597	4,82	0,25	0,64	6,00	3,43	0,22	0,16	0,43	0,48
PL 20	CATAENAT	1996	1 963	5,09	0,22	0,46	3,11	1,83	0,15	0,09	0,24	0,61
PL 20	CATAENAT	1997	1 422	5,02	0,20	0,68	7,94	4,44	0,18	0,20	0,57	0,49
PL 20	CATAENAT	1998	1 469	5,02	0,28	0,62	4,85	2,78	0,26	0,13	0,36	0,50
PM 40	CATAENAT	1993	1 001	5,10	0,26	0,61	1,60	0,90	0,37	0,09	0,14	0,44
PM 40	CATAENAT	1994	969	5,03	0,21	0,56	2,94	1,73	0,26	0,12	0,26	0,78
PM 40	CATAENAT	1995	884	4,96	0,24	0,46	1,46	0,81	0,28	0,05	0,12	0,36
PM 40	CATAENAT	1996	982	4,67	0,26	0,56	2,83	1,69	0,29	0,07	0,22	0,34
PM 40	CATAENAT	1997	1 105	4,93	0,20	0,42	1,25	0,70	0,25	0,05	0,08	0,19
PM 40	CATAENAT	1998	959	5,05	0,22	0,47	2,04	1,16	0,30	0,14	0,16	0,34
REV	NERA	1993	1 033	4,92	0,33	0,51	0,79	0,42	0,67	0,03	0,10	0,23
REV	NERA	1994	947	5,18	0,36	0,55	1,07	0,66	0,84	0,04	0,21	0,35
REV	NERA	1995	1 254	4,98	0,36	0,55	0,83	0,47	0,69	0,04	0,09	0,18
REV	NERA	1996	978	4,61	0,39	0,56	0,57	0,32	0,52	0,04	0,06	0,21
REV	NERA	1997	1 196	4,95	0,30	0,43	0,77	0,45	0,44	0,05	0,08	0,25
REV	NERA	1998	1 464	4,85	0,30	0,45	0,88	0,52	0,40	0,04	0,07	0,19
SP 25	CATAENAT	1993	1 567	4,97	0,25	0,47	0,17	0,09	0,37	0,00	0,02	0,42
SP 25	CATAENAT	1994	1 645	5,15	0,19	0,31	0,24	0,14	0,31	0,02	0,05	0,72
SP 25	CATAENAT	1995	1 891	5,06	0,21	0,28	0,18	0,10	0,27	0,02	0,01	0,19
SP 25	CATAENAT	1996	1 474	4,91	0,28	0,37	0,28	0,13	0,37	0,02	0,01	0,37
SP 25	CATAENAT	1997	1 618	5,21	0,18	0,24	0,25	0,12	0,26	0,01	0,01	0,22
SP 25	CATAENAT	1998	1 410	5,04	0,21	0,27	0,31	0,15	0,27	0,00	0,01	0,17



Annexe 2

Données de concentrations moyennes pondérées des précipitations totales (réseau CATAENAT)

Code Station	Année	Pluie mm	pH	N-NO ₃ mg/L	S-SO ₄ mg/L	Cl mg/L	Na mg/L	N-NH ₄ mg/L	K mg/L	Mg mg/L	Ca mg/L
CHP 40	1993	1 051	4,98	0,29	0,83	3,77	2,41	0,50	0,20	0,34	0,79
CHP 40	1994	1 163	4,73	0,22	0,79	4,85	3,02	0,18	0,21	0,38	0,52
CHP 40	1995	1 076	4,79	0,23	0,56	2,97	1,66	0,25	0,15	0,21	0,39
CHP 40	1996	1 194	4,73	0,26	0,71	5,50	3,31	0,24	0,20	0,40	0,44
CHP 40	1997	1 341	4,82	0,23	0,59	2,93	1,69	0,22	0,13	0,21	0,42
CHP 40	1998	1 172	5,03	0,26	0,70	5,02	2,91	0,29	0,21	0,37	0,57
CHP 59	1993	891	5,03	0,50	0,98	2,06	1,23	0,79	0,15	0,16	0,64
CHP 59	1994	881	4,99	0,37	0,77	1,45	0,96	0,71	0,13	0,12	0,56
CHP 59	1995	965	4,87	0,52	0,89	1,92	1,06	0,79	0,18	0,15	0,47
CHP 59	1996	806	4,81	0,52	0,90	1,37	0,81	0,84	0,13	0,10	0,60
CHP 59	1997	896	5,11	0,41	0,61	1,24	0,71	0,62	0,14	0,11	0,43
CHP 59	1998	988	5,01	0,48	0,78	1,65	0,93	0,77	0,17	0,14	0,46
CHS 35	1993	820	5,27	0,31	0,75	3,10	1,76	0,83	0,24	0,26	0,46
CHS 35	1994	1 012	5,50	0,26	0,59	2,32	1,37	0,62	0,17	0,22	0,44
CHS 35	1995	865	5,49	0,31	0,57	2,53	1,29	0,64	0,19	0,20	0,34
CHS 35	1996	665	5,42	0,29	0,60	3,01	1,78	0,60	0,17	0,28	0,42
CHS 35	1997	716	5,46	0,29	0,60	2,31	1,37	0,49	0,22	0,18	0,34
CHS 35	1998	1 043	5,67	0,24	0,49	2,39	1,38	0,52	0,16	0,20	0,30
CHS 41	1993	662	4,98	0,50	0,92	1,19	0,69	0,93	0,21	0,10	0,84
CHS 41	1994	822	5,36	0,24	0,51	1,28	0,80	0,53	0,21	0,11	0,58
CHS 41	1995	861	5,27	0,35	0,56	1,45	0,83	0,47	0,14	0,11	0,49
CHS 41	1996	588	5,21	0,36	0,54	1,13	0,66	0,68	0,21	0,08	0,64
CHS 41	1997	707	5,42	0,33	0,48	1,20	0,68	0,44	0,15	0,09	0,59
CHS 41	1998	808	5,37	0,29	0,44	1,33	0,73	0,45	0,13	0,10	0,39
CPS 77	1993	684	5,03	0,35	0,66	0,72	0,39	0,79	0,19	0,07	0,57
CPS 77	1994	743	5,07	0,29	0,48	0,97	0,56	0,34	0,14	0,07	0,57
CPS 77	1995	748	4,80	0,46	0,67	1,09	0,56	0,62	0,20	0,09	0,51
CPS 77	1996	548	4,84	0,46	0,58	1,02	0,54	0,51	0,25	0,06	0,57
CPS 77	1997	857	5,11	0,28	0,36	0,63	0,34	0,32	0,13	0,04	0,40
CPS 77	1998	742	5,15	0,28	0,40	0,93	0,52	0,36	0,12	0,07	0,43

Stations	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
DOU 71	1993	1 382	5,13	0,24	0,48	0,75	0,49	0,45	0,07	0,09	0,35
DOU 71	1994	1 708	5,40	0,22	0,42	0,67	0,47	0,41	0,12	0,10	0,50
DOU 71	1995	1 624	5,42	0,24	0,38	0,62	0,40	0,44	0,08	0,05	0,28
DOU 71	1996	1 256	5,13	0,29	0,42	0,64	0,43	0,45	0,09	0,05	0,31
DOU 71	1997	1 454	5,30	0,23	0,39	0,67	0,42	0,43	0,11	0,05	0,37
DOU 71	1998	1 550	5,18	0,26	0,40	0,88	0,50	0,51	0,14	0,08	0,45
EPC 08	1993	1 453	4,76	0,46	0,83	1,12	0,62	0,97	0,15	0,08	0,32
EPC 08	1994	1 382	4,95	0,40	0,64	1,19	0,70	0,70	0,18	0,10	0,35
EPC 08	1995	1 575	4,85	0,41	0,64	1,22	0,65	0,66	0,15	0,09	0,26
EPC 08	1996	1 060	4,84	0,56	0,82	1,14	0,66	0,91	0,17	0,09	0,50
EPC 08	1997	1 317	5,22	0,40	0,61	0,97	0,56	0,83	0,22	0,09	0,36
EPC 08	1998	1 545	4,95	0,39	0,56	1,20	0,68	0,67	0,15	0,10	0,28
EPC 63	1993	1 061	5,10	0,25	0,55	0,50	0,28	0,86	0,20	0,05	0,40
EPC 63	1994	1 354	5,35	0,24	0,50	0,49	0,31	0,62	0,15	0,06	0,48
EPC 63	1995	1 241	5,81	0,26	0,53	0,60	0,38	1,12	0,20	0,06	0,43
EPC 63	1996	1 087	5,17	0,31	0,50	0,65	0,35	0,78	0,17	0,04	0,40
EPC 63	1997	1 002	5,54	0,23	0,35	0,60	0,41	0,60	0,15	0,05	0,33
EPC 63	1998	1 174	5,52	0,24	0,33	0,46	0,27	0,49	0,08	0,04	0,31
EPC 74	1993	1 470	5,10	0,25	0,45	0,22	0,10	0,40	0,06	0,03	0,50
EPC 74	1994	1 312	5,00	0,50	0,49	0,50	0,18	0,54	0,09	0,02	0,64
EPC 74	1995	1 500	4,96	0,24	0,35	0,18	0,10	0,24	0,06	0,01	0,23
EPC 74	1996	1 350	4,89	0,29	0,41	0,24	0,09	0,32	0,12	0,01	0,39
EPC 74	1997	1 410	5,07	0,24	0,38	0,22	0,12	0,30	0,04	0,01	0,28
EPC 74	1998	1 293	5,09	0,25	0,33	0,22	0,12	0,27	0,02	0,01	0,26
EPC 87	1993	1 493	5,06	0,39	0,54	0,93	0,52	0,43	0,09	0,07	0,37
EPC 87	1994	1 910	5,06	0,22	0,43	0,97	0,59	0,30	0,11	0,09	0,31
EPC 87	1995	1 686	5,11	0,22	0,38	0,98	0,54	0,31	0,12	0,06	0,20
EPC 87	1996	1 294	5,05	0,25	0,41	1,13	0,65	0,30	0,12	0,07	0,53
EPC 87	1997	1 445	5,09	0,22	0,39	1,05	0,59	0,29	0,13	0,07	0,29
EPC 87	1998	1 586	5,21	0,22	0,37	1,08	0,62	0,33	0,10	0,08	0,29
HET 30	1993	2 401	4,92	0,32	0,84	0,73	0,48	0,52	0,06	0,08	0,67
HET 30	1994	2 921	5,10	0,23	0,50	0,71	0,45	0,31	0,07	0,08	0,66
HET 30	1995	2 718	4,65	0,28	0,63	0,89	0,56	0,34	0,10	0,06	0,29
HET 30	1996	4 605	4,94	0,23	0,52	0,79	0,48	0,25	0,07	0,06	0,59
HET 30	1997	2 402	4,93	0,20	0,46	0,59	0,35	0,23	0,05	0,03	0,31
HET 30	1998	1 549	4,96	0,26	0,52	0,84	0,52	0,34	0,05	0,06	0,30

Stations	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
HET 54	1993	828	4,89	0,41	0,69	0,62	0,31	0,80	0,18	0,05	0,45
HET 54	1994	943	4,93	0,41	0,62	0,57	0,29	0,69	0,16	0,04	0,45
HET 54	1995	1 121	4,94	0,43	0,63	0,55	0,27	0,65	0,16	0,06	0,31
HET 54	1996	788	4,78	0,50	0,64	0,56	0,28	0,65	0,12	0,02	0,39
HET 54	1997	936	5,14	0,34	0,47	0,52	0,27	0,47	0,16	0,05	0,56
HET 54	1998	934	5,22	0,37	0,49	0,78	0,40	0,55	0,28	0,07	0,44
HET 64	1993	1 289	4,84	0,35	0,87	1,41	0,88	0,62	0,08	0,13	0,58
HET 64	1994	1 528	4,83	0,28	0,77	2,09	1,31	0,37	0,13	0,17	0,49
HET 64	1995	1 273	5,09	0,30	0,67	1,82	1,10	0,40	0,11	0,15	0,52
HET 64	1996	1 518	4,81	0,28	0,68	2,75	1,65	0,49	0,12	0,20	0,42
HET 64	1997	1 337	5,10	0,25	0,58	1,22	0,72	0,29	0,09	0,09	0,51
HET 64	1998	1 323	5,10	0,29	0,65	2,28	1,33	0,42	0,08	0,17	0,46
PL 20	1993	1 461	5,54	0,26	0,75	5,58	3,15	0,33	0,34	0,50	1,71
PL 20	1994	1 425	5,06	0,22	0,63	4,74	2,84	0,12	0,21	0,40	0,73
PL 20	1995	1 597	4,90	0,26	0,74	7,06	4,01	0,32	0,32	0,51	0,62
PL 20	1996	1 963	5,20	0,24	0,55	3,89	2,31	0,33	0,19	0,33	0,84
PL 20	1997	1 422	5,18	0,20	0,60	6,53	3,60	0,17	0,27	0,48	0,55
PL 20	1998	1 469	5,01	0,32	0,69	4,86	2,78	0,30	0,17	0,38	0,73
PM 17	1993	749	5,12	0,28	0,99	9,27	5,47	0,61	0,32	0,71	1,01
PM 17	1994	1 149	4,93	0,21	0,69	6,77	4,09	0,08	0,21	0,51	0,52
PM 17	1995	811	4,79	0,28	0,90	9,28	5,13	0,17	0,32	0,63	0,65
PM 17	1996	635	4,84	0,31	0,73	6,54	3,86	0,25	0,22	0,48	0,63
PM 17	1997	787	4,97	0,28	0,74	6,73	3,76	0,19	0,32	0,47	0,59
PM 17	1998	796	4,90	0,28	0,86	8,23	4,81	0,20	0,23	0,59	0,70
PM 40	1993	1 001	5,07	0,30	0,74	1,79	1,19	0,50	0,13	0,14	0,53
PM 40	1994	969	5,07	0,25	0,67	2,63	1,65	0,34	0,24	0,24	0,63
PM 40	1995	884	4,91	0,28	0,57	1,80	1,07	0,31	0,12	0,15	0,48
PM 40	1996	982	4,79	0,29	0,66	2,92	1,77	0,35	0,17	0,21	0,44
PM 40	1997	1 105	4,93	0,24	0,52	1,54	0,93	0,24	0,09	0,10	0,38
PM 40	1998	959	5,13	0,26	0,56	2,23	1,31	0,36	0,15	0,18	0,49
PM 72	1993	770	5,01	0,40	0,79	1,41	0,87	0,87	0,17	0,11	0,47
PM 72	1994	1 086	5,16	0,26	0,50	1,31	0,81	0,44	0,14	0,11	0,35
PM 72	1995	879	5,26	0,33	0,57	1,76	0,98	0,49	0,14	0,15	0,50
PM 72	1996	588	5,30	0,31	0,49	1,50	0,90	0,55	0,20	0,14	0,47
PM 72	1997	671	5,38	0,27	0,42	1,49	0,86	0,46	0,14	0,12	0,34
PM 72	1998	821	5,36	0,24	0,44	1,58	0,95	0,47	0,11	0,13	0,28

Stations	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
PM 85	1993	715	6,07	0,28	1,19	13,04	7,50	0,38	0,35	1,15	2,74
PM 85	1994	978	5,71	0,18	0,70	7,74	4,47	0,11	0,39	0,71	1,57
PM 85	1995	788	5,68	0,25	0,92	10,90	5,69	0,22	0,50	0,87	1,73
PM 85	1996	743	5,42	0,25	0,81	9,65	5,72	0,33	0,31	0,80	1,05
PM 85	1997	691	5,39	0,23	0,76	8,89	5,04	0,21	0,28	0,69	0,91
PM 85	1998	743	5,43	0,21	0,92	12,05	6,99	0,25	0,35	0,91	1,02
PS 44	1993	798	5,06	0,21	0,74	4,67	2,75	0,54	0,19	0,35	0,40
PS 44	1994	1 061	4,99	0,18	0,58	3,76	2,25	0,15	0,20	0,30	0,41
PS 44	1995	1 142	5,11	0,24	0,61	4,90	2,58	0,37	0,21	0,37	0,34
PS 44	1996	738	5,07	0,30	0,64	3,79	2,17	0,46	0,17	0,36	0,64
PS 44	1997	784	5,09	0,25	0,59	3,29	1,82	0,44	0,16	0,23	0,29
PS 44	1998	947	5,09	0,23	0,65	4,32	2,50	0,39	0,17	0,40	0,37
PS 67	1993	752	4,82	0,59	0,89	0,65	0,31	0,99	0,26	0,10	0,65
PS 67	1994	864	4,77	0,49	0,74	0,59	0,40	0,68	0,14	0,05	0,56
PS 67	1995	962	4,88	0,47	0,67	0,47	0,26	0,67	0,15	0,06	0,38
PS 67	1996	712	4,67	0,53	0,67	0,50	0,27	0,61	0,10	0,02	0,38
PS 67	1997	777	5,00	0,40	0,52	0,49	0,26	0,56	0,15	0,04	0,42
PS 67	1998	754	4,87	0,38	0,45	0,56	0,28	0,43	0,10	0,04	0,32
PS 76	1993	959	4,75	0,39	0,95	2,54	1,50	0,59	0,18	0,21	0,45
PS 76	1994	1 162	4,91	0,33	0,79	2,34	1,38	0,50	0,18	0,16	0,41
PS 76	1995	864	4,80	0,47	1,07	3,03	1,69	0,54	0,32	0,23	0,63
PS 76	1996	713	4,72	0,45	0,97	3,16	1,93	0,60	0,20	0,19	0,46
PS 76	1997	775	4,90	0,37	0,79	1,69	0,99	0,52	0,15	0,10	0,40
PS 76	1998	1 065	4,91	0,34	0,79	3,36	2,03	0,45	0,13	0,24	0,49
SP 05	1993	856	6,13	0,20	0,54	0,41	0,18	0,48	0,15	0,10	2,32
SP 05	1994	1 168	5,61	0,18	0,57	0,26	0,15	0,14	0,08	0,08	1,29
SP 05	1995	1 100	5,67	0,24	0,44	0,84	0,19	0,26	0,12	0,10	1,91
SP 05	1996	1 127	5,53	0,19	0,49	0,31	0,11	0,22	0,10	0,05	1,22
SP 05	1997	932	5,40	0,18	0,49	0,35	0,16	0,21	0,13	0,07	0,95
SP 05	1998	861	5,91	0,21	0,63	0,40	0,19	0,29	0,14	0,10	1,39
SP 11	1993	998	5,01	0,31	0,67	0,57	0,37	0,55	0,08	0,06	1,12
SP 11	1994	1 074	4,94	0,22	0,52	0,65	0,45	0,22	0,08	0,06	0,53
SP 11	1995	1 258	5,16	0,25	0,52	0,77	0,37	0,32	0,09	0,09	0,54
SP 11	1996	1 511	4,97	0,22	0,40	0,78	0,37	0,24	0,06	0,07	0,39
SP 11	1997	818	5,27	0,26	0,50	0,61	0,33	0,30	0,09	0,06	0,71
SP 11	1998	1 177	5,07	0,24	0,44	0,99	0,43	0,32	0,08	0,10	0,40

Stations	Année	Pluie	pH	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
SP 25	1993	1 567	5,06	0,26	0,49	0,37	0,22	0,45	0,04	0,03	0,59
SP 25	1994	1 645	5,19	0,24	0,38	0,32	0,26	0,30	0,06	0,03	0,64
SP 25	1995	1 891	5,06	0,25	0,34	0,27	0,20	0,29	0,02	0,01	0,23
SP 25	1996	1 474	4,89	0,30	0,40	0,33	0,20	0,33	0,02	0,01	0,37
SP 25	1997	1 618	5,23	0,22	0,29	0,35	0,20	0,29	0,05	0,01	0,30
SP 25	1998	1 410	5,07	0,25	0,33	0,43	0,29	0,33	0,05	0,03	0,29
SP 38	1993	1 368	5,17	0,28	0,54	0,34	0,18	0,30	0,09	0,03	0,71
SP 38	1994	1 510	4,96	0,23	0,39	0,18	0,12	0,18	0,05	0,01	0,38
SP 38	1995	1 738	4,93	0,25	0,37	0,22	0,14	0,22	0,05	0,02	0,27
SP 38	1996	1 493	4,80	0,35	0,45	0,20	0,10	0,35	0,03	0,00	0,34
SP 38	1997	1 184	5,02	0,22	0,34	0,23	0,14	0,23	0,06	0,01	0,26
SP 38	1998	1 403	5,07	0,24	0,34	0,23	0,15	0,25	0,04	0,01	0,40
SP 57	1993	1 307	4,73	0,37	0,61	0,46	0,27	0,48	0,11	0,03	0,28
SP 57	1994	1 425	4,85	0,44	0,67	0,56	0,34	0,77	0,29	0,09	0,54
SP 57	1995	1 688	4,83	0,44	0,62	0,55	0,31	0,78	0,23	0,05	0,36
SP 57	1996	1 067	4,66	0,46	0,56	0,53	0,28	0,52	0,05	0,01	0,24
SP 57	1997	1 280	4,97	0,32	0,37	0,41	0,23	0,40	0,10	0,02	0,27
SP 57	1998	1 326	4,91	0,35	0,41	0,57	0,32	0,41	0,08	0,03	0,21
SP 68	1993	1 181	4,98	0,31	0,50	0,44	0,26	0,43	0,08	0,02	0,22
SP 68	1994	1 419	4,96	0,25	0,38	0,38	0,24	0,28	0,11	0,02	0,21
SP 68	1995	1 693	5,01	0,24	0,36	0,37	0,20	0,28	0,09	0,02	0,12
SP 68	1996	1 105	4,88	0,34	0,44	0,39	0,20	0,40	0,08	0,01	0,18
SP 68	1997	1 394	5,10	0,22	0,30	0,36	0,20	0,26	0,07	0,01	0,22
SP 68	1998	1 515	5,02	0,24	0,33	0,49	0,29	0,29	0,06	0,04	0,21

Annexe 3

Données de dépôts annuels *stricto sensu* (réseaux MERA et CATAENAT)

Code Station	Réseau	Année	Pluie mm	H g/ha	N-NO ₃ kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	Cl kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha
BON	MERA	1993	1 848	86	4,8	7,5	7,1	4,1	13,1	0,7	1,2	8,6
BON	MERA	1994	1 786	104	4,1	6,1	6,1	3,7	8,9	0,9	1,0	9,5
BON	MERA	1995	2 377	115	4,3	6,2	5,9	3,4	8,9	0,8	2,6	5,0
BON	MERA	1996	1 517	148	3,4	4,4	4,0	2,3	4,4	0,5	1,1	5,1
BON	MERA	1997	1 671	108	2,9	4,0	5,1	2,9	3,6	0,8	0,9	4,5
BRO	MERA	1993	803	66	2,2	4,6	15,2	8,7	5,8	0,6	1,3	1,9
BRO	MERA	1994	922	66	2,3	5,2	16,0	9,2	8,2	0,7	1,7	3,3
BRO	MERA	1995	625	52	2,0	3,9	11,3	6,0	4,5	0,5	1,1	1,6
BRO	MERA	1996	513	89	1,8	3,3	10,5	6,1	2,8	0,4	1,0	1,6
BRO	MERA	1997	703	108	1,8	3,0	7,0	3,9	2,5	0,4	0,7	1,2
BRO	MERA	1998	958	110	2,3	4,9	21,6	12,3	3,7	0,9	1,7	2,5
CAS	MERA	1993	793	26	1,5	2,9	1,8	1,0	4,6	0,5	0,4	6,5
CAS	MERA	1994	783	37	1,5	2,5	1,4	0,8	2,5	0,6	0,3	5,1
CAS	MERA	1995	736	38	1,2	2,0	1,1	0,5	2,8	0,5	0,3	3,3
CAS	MERA	1996	560	80	1,3	2,1	1,4	0,5	1,5	1,2	0,2	3,7
CAS	MERA	1997	558	12	0,9	1,6	1,0	0,5	0,8	0,3	0,3	4,4
CAS	MERA	1998	600	21	1,1	1,7	1,1	0,6	1,0	0,5	0,3	3,8
CHP 59	CATAENAT	1995	965	170	4,1	6,6	14,4	6,8	6,5	0,5	1,0	2,3
CHP 59	CATAENAT	1996	806	156	3,4	5,5	9,0	6,0	5,5	0,6	0,5	2,3
CHP 59	CATAENAT	1997	896	112	2,8	4,1	8,6	4,9	4,3	0,7	0,6	1,7
CHP 59	CATAENAT	1998	988	137	3,9	5,8	12,4	7,0	6,0	0,5	0,9	2,2
CHS 35	CATAENAT	1993	820	42	1,8	4,1	19,1	10,5	4,4	0,4	1,5	1,6
CHS 35	CATAENAT	1994	1 012	37	2,2	4,5	15,9	9,3	5,8	1,8	2,9	4,9
CHS 35	CATAENAT	1995	865	44	1,9	3,4	15,8	8,0	4,1	0,5	1,3	2,1
CHS 35	CATAENAT	1996	665	21	1,2	2,4	12,9	7,2	2,8	0,5	1,3	2,2
CHS 35	CATAENAT	1997	716	24	1,9	2,8	11,9	6,6	3,3	0,7	1,0	1,7
CHS 35	CATAENAT	1998	1 043	28	1,8	3,5	17,6	10,0	4,3	0,6	1,5	1,8
CPS 77	CATAENAT	1993	684	45	2,2	4,1	3,2	1,6	3,5	0,5	0,3	3,3
CPS 77	CATAENAT	1994	743	44	1,7	2,6	4,0	2,4	3,1	0,3	0,4	3,0
CPS 77	CATAENAT	1995	748	128	3,0	4,0	5,1	2,7	4,1	0,4	0,4	1,8
CPS 77	CATAENAT	1996	548	89	2,2	2,8	4,4	2,3	2,7	0,6	0,3	1,9
CPS 77	CATAENAT	1997	857	62	1,9	2,4	3,6	1,9	2,7	0,5	0,3	2,0
CPS 77	CATAENAT	1998	742	63	2,0	2,8	5,7	3,2	2,7	0,5	0,4	2,1

Station	Réseau	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
CRO	AMERA	1993	1 284	46	3,1	5,6	8,4	4,4	8,7	0,7	1,0	3,9
CRO	AMERA	1994	1 121	49	2,9	5,4	13,0	7,9	7,3	0,7	2,0	3,2
CRO	AMERA	1995	649	26	1,3	2,2	5,5	3,0	3,4	0,3	0,6	1,4
CRO	AMERA	1996	744	67	1,7	2,7	11,1	6,4	2,2	0,5	1,6	1,8
CRO	AMERA	1997	859	55	1,9	3,0	9,5	6,0	2,7	0,7	1,3	1,9
CRO	AMERA	1998	782	72	1,8	3,1	9,0	5,4	2,2	0,6	0,9	1,5
DON	AMERA	1993	1 848	167	5,7	9,2	8,2	4,6	13,2	1,8	0,7	3,8
DON	AMERA	1994	1 786	192	5,7	8,7	6,7	4,2	12,7	1,2	1,6	4,2
DON	AMERA	1995	1 906	213	6,4	9,2	9,5	5,3	11,7	0,9	1,1	3,2
DON	AMERA	1996	1 206	268	4,1	5,1	4,2	2,4	5,1	0,5	0,5	1,6
DON	AMERA	1997	1 493	202	3,8	5,0	5,0	3,0	4,7	0,5	0,6	3,0
DON	AMERA	1998	1 549	185	3,4	4,4	6,4	3,8	3,8	0,7	0,6	2,0
DOU 71	CATAENAT	1996	1 256	144	3,7	5,1	8,0	4,6	4,6	1,0	0,6	3,5
DOU 71	CATAENAT	1997	1 454	114	2,9	4,6	7,8	4,5	4,6	0,5	0,6	3,7
DOU 71	CATAENAT	1998	1 550	140	3,4	4,9	9,3	5,2	4,9	0,4	0,8	6,0
EPC 63	CATAENAT	1993	1 061	93	2,8	5,5	3,5	1,9	5,9	0,4	0,2	2,7
EPC 63	CATAENAT	1994	1 354	137	3,9	7,5	5,2	3,4	7,9	1,1	0,3	4,5
EPC 63	CATAENAT	1996	1 087	96	3,4	4,5	5,9	3,4	5,1	1,1	0,1	1,7
EPC 63	CATAENAT	1997	1 002	47	1,8	3,0	3,7	2,1	3,5	0,9	0,1	1,6
HAG	AMERA	1993	830	40	3,6	7,4	85,1	48,7	7,1	3,7	5,7	4,1
HAG	AMERA	1994	1 043	47	3,1	8,3	113,9	65,0	5,4	3,2	9,2	6,0
HAG	AMERA	1995	826	71	3,2	7,7	98,1	52,6	4,7	3,4	7,4	4,4
HAG	AMERA	1996	847	187	3,3	7,1	65,8	39,2	3,1	1,5	5,2	3,0
HAG	AMERA	1997	944	88	2,3	5,6	57,4	32,8	2,8	1,5	4,3	2,8
HAG	AMERA	1998	1 061	110	3,0	8,4	106,0	61,4	3,7	2,5	7,8	4,2
IRA	AMERA	1993	1 821	132	5,0	10,8	7,3	4,2	13,3	0,6	1,5	9,9
IRA	AMERA	1994	1 194	47	2,1	4,3	5,0	3,4	5,5	0,6	1,0	6,2
IRA	AMERA	1995	606	22	1,5	3,0	4,6	3,0	4,1	0,5	0,7	4,3
IRA	AMERA	1996	1 421	114	3,5	6,4	10,0	6,3	4,3	0,6	1,5	9,0
IRA	AMERA	1997	1 257	68	1,8	3,9	5,9	3,7	2,3	0,5	0,8	6,6
IRA	AMERA	1998	1 449	109	2,8	5,6	15,8	9,8	4,9	1,3	1,7	5,7
MOR	AMERA	1993	1 444	59	3,3	5,6	9,1	5,2	12,1	0,8	1,5	3,6
MOR	AMERA	1994	1 586	55	4,0	6,1	7,1	4,5	13,6	0,6	1,9	5,7
MOR	AMERA	1995	1 608	84	3,9	5,9	9,0	4,4	9,5	1,1	1,6	3,2
MOR	AMERA	1996	1 036	149	3,1	4,1	4,2	2,6	4,2	0,5	0,6	2,3
MOR	AMERA	1997	1 201	84	2,1	3,3	6,0	3,6	3,0	0,9	0,7	2,1
MOR	AMERA	1998	1 167	129	2,8	3,8	6,0	3,6	3,4	0,7	0,7	2,5

Station	Réseau	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
PEY	NERA	1995	873	55	2,4	4,5	11,4	6,5	5,3	0,6	1,1	3,6
PEY	NERA	1996	754	112	2,1	4,2	19,0	10,8	2,5	0,9	1,6	2,8
PEY	NERA	1997	964	77	1,8	4,2	9,8	5,8	2,3	0,7	1,0	3,9
PEY	NERA	1998	882	87	2,4	4,9	14,7	8,9	3,2	1,2	1,3	4,7
PL 20	CATAENAT	1994	1 425	141	2,7	7,5	54,4	32,7	1,8	1,5	4,4	7,2
PL 20	CATAENAT	1995	1 597	242	4,0	10,2	95,8	54,7	3,6	2,6	6,9	7,6
PL 20	CATAENAT	1996	1 963	159	4,2	9,1	61,1	36,0	3,0	1,8	4,8	11,9
PL 20	CATAENAT	1997	1 422	136	2,9	9,6	112,9	63,1	2,5	2,8	8,1	7,0
PL 20	CATAENAT	1998	1 469	139	4,1	9,1	71,2	40,9	3,8	1,9	5,3	7,4
PM 40	CATAENAT	1993	1 001	79	2,6	6,1	16,0	9,0	3,7	0,9	1,4	4,4
PM 40	CATAENAT	1994	969	90	2,0	5,4	28,5	16,8	2,6	1,1	2,5	7,6
PM 40	CATAENAT	1995	884	96	2,1	4,1	12,9	7,2	2,5	0,5	1,0	3,2
PM 40	CATAENAT	1996	982	212	2,6	5,5	27,8	16,6	2,8	0,7	2,1	3,4
PM 40	CATAENAT	1997	1 105	130	2,2	4,7	13,8	7,8	2,8	0,5	0,9	2,1
PM 40	CATAENAT	1998	959	85	2,1	4,5	19,5	11,1	2,9	1,4	1,6	3,2
REV	NERA	1993	1 033	107	2,9	4,5	7,0	3,7	5,9	0,3	0,9	2,0
REV	NERA	1994	947	58	3,2	4,9	9,5	5,9	7,4	0,4	1,9	3,1
REV	NERA	1995	1 254	128	4,1	6,3	9,5	5,3	7,9	0,4	1,1	2,1
REV	NERA	1996	978	212	3,2	4,6	4,6	2,6	4,2	0,3	0,5	1,7
REV	NERA	1997	1 196	132	3,4	4,8	8,6	5,0	4,9	0,5	0,9	2,8
REV	NERA	1998	1 464	199	4,1	6,3	12,2	7,2	5,6	0,6	1,0	2,6
SP 25	CATAENAT	1993	1 567	167	3,8	7,3	2,6	1,4	5,9	0,1	0,3	6,6
SP 25	CATAENAT	1994	1 645	117	3,2	5,1	3,9	2,3	5,1	0,3	0,8	11,8
SP 25	CATAENAT	1995	1 891	163	4,0	5,3	3,4	1,8	5,0	0,3	0,2	3,6
SP 25	CATAENAT	1996	1 474	180	4,1	5,5	4,1	1,9	5,5	0,3	0,1	5,5
SP 25	CATAENAT	1997	1 618	101	2,9	3,9	4,0	2,0	4,2	0,2	0,2	3,5
SP 25	CATAENAT	1998	1 410	130	3,0	3,8	4,3	2,1	3,8	0,1	0,2	2,4

Annexe 4

Données de dépôts totaux annuels (réseau CATAENAT)

Code Station	Année	Pluie mm	H g/ha	N-NO ₃ kg/ha	S-SO ₄ kg/ha	Cl kg/ha	Na kg/ha	N-NH ₄ kg/ha	K kg/ha	Mg kg/ha	Ca kg/ha
CHP 40	1993	1 051	110	3,0	8,7	39,6	25,4	5,3	2,1	3,5	8,3
CHP 40	1994	1 163	215	2,6	9,2	56,3	35,1	2,1	2,4	4,4	6,1
CHP 40	1995	1 076	173	2,5	6,1	32,0	17,8	2,7	1,6	2,3	4,2
CHP 40	1996	1 194	225	3,1	8,4	65,6	39,5	2,9	2,4	4,7	5,2
CHP 40	1997	1 341	203	3,0	8,0	39,4	22,6	2,9	1,8	2,8	5,6
CHP 40	1998	1 172	109	3,1	8,2	58,8	34,2	3,3	2,5	4,3	6,7
CHP 59	1993	891	84	4,4	8,8	18,3	10,9	7,0	1,3	1,4	5,7
CHP 59	1994	881	91	3,3	6,8	12,8	8,5	6,2	1,2	1,0	4,9
CHP 59	1995	965	130	5,0	8,6	18,5	10,2	7,6	1,7	1,4	4,6
CHP 59	1996	806	126	4,2	7,3	11,0	6,5	6,8	1,0	0,8	4,8
CHP 59	1997	896	70	3,7	5,5	11,1	6,4	5,6	1,2	1,0	3,8
CHP 59	1998	988	97	4,8	7,7	16,3	9,2	7,7	1,7	1,3	4,5
CHS 35	1993	820	44	2,5	6,2	25,4	14,4	6,8	1,9	2,1	3,8
CHS 35	1994	1 012	32	2,6	6,0	23,5	13,8	6,2	1,8	2,2	4,5
CHS 35	1995	865	28	2,6	4,9	21,9	11,2	5,5	1,7	1,8	3,0
CHS 35	1996	665	25	1,9	4,0	20,0	11,8	4,0	1,1	1,8	2,8
CHS 35	1997	716	25	2,1	4,3	16,5	9,8	3,5	1,6	1,3	2,5
CHS 35	1998	1 043	22	2,6	5,1	24,9	14,4	5,4	1,7	2,1	3,1
CHS 41	1993	662	69	3,3	6,1	7,9	4,6	6,2	1,4	0,7	5,5
CHS 41	1994	822	36	2,0	4,2	10,5	6,6	4,3	1,7	0,9	4,8
CHS 41	1995	861	46	3,0	4,8	12,5	7,2	4,1	1,2	0,9	4,2
CHS 41	1996	588	36	2,1	3,2	6,7	3,9	4,0	1,3	0,5	3,8
CHS 41	1997	707	27	2,3	3,4	8,5	4,8	3,1	1,0	0,7	4,2
CHS 41	1998	808	35	2,4	3,6	10,7	5,9	3,6	1,0	0,8	3,2
CPS 77	1993	684	64	2,4	4,5	4,9	2,7	5,4	1,3	0,4	3,9
CPS 77	1994	743	63	2,1	3,6	7,2	4,2	2,5	1,0	0,6	4,2
CPS 77	1995	748	118	3,4	5,0	8,2	4,2	4,6	1,5	0,6	3,8
CPS 77	1996	548	80	2,5	3,2	5,6	2,9	2,8	1,4	0,3	3,1
CPS 77	1997	857	66	2,4	3,0	5,4	2,9	2,8	1,1	0,3	3,4
CPS 77	1998	742	53	2,1	3,0	6,9	3,8	2,7	0,9	0,5	3,2

Station	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
DOU 71	1993	1 382	104	3,3	6,6	10,4	6,8	6,2	1,0	1,3	4,8
DOU 71	1994	1 708	68	3,7	7,2	11,5	8,0	7,0	2,0	1,7	8,5
DOU 71	1995	1 624	62	4,0	6,1	10,0	6,4	7,2	1,3	0,8	4,6
DOU 71	1996	1 256	93	3,7	5,3	8,1	5,4	5,6	1,1	0,6	3,9
DOU 71	1997	1 454	73	3,4	5,7	9,8	6,1	6,2	1,7	0,8	5,5
DOU 71	1998	1 550	103	4,0	6,2	13,7	7,8	7,8	2,2	1,2	7,0
EPC 08	1993	1 453	253	6,7	12,0	16,3	9,1	14,1	2,2	1,1	4,6
EPC 08	1994	1 382	157	5,5	8,9	16,4	9,7	9,6	2,4	1,4	4,9
EPC 08	1995	1 575	222	6,5	10,1	19,1	10,3	10,4	2,4	1,5	4,1
EPC 08	1996	1 060	153	5,9	8,7	12,0	7,0	9,7	1,8	1,0	5,3
EPC 08	1997	1 317	79	5,2	8,0	12,8	7,4	11,0	2,8	1,2	4,7
EPC 08	1998	1 545	172	6,0	8,7	18,6	10,5	10,4	2,2	1,5	4,3
EPC 63	1993	1 061	85	2,7	5,8	5,3	2,9	9,1	2,1	0,6	4,2
EPC 63	1994	1 354	60	3,2	6,8	6,6	4,2	8,4	2,1	0,8	6,5
EPC 63	1995	1 241	19	3,2	6,5	7,4	4,7	13,9	2,5	0,7	5,3
EPC 63	1996	1 087	73	3,4	5,4	7,1	3,8	8,5	1,8	0,5	4,3
EPC 63	1997	1 002	29	2,3	3,5	6,0	4,1	6,0	1,5	0,5	3,3
EPC 63	1998	1 174	35	2,8	3,9	5,4	3,2	5,8	0,9	0,5	3,6
EPC 74	1993	1 470	117	3,7	6,6	3,2	1,5	5,9	0,8	0,4	7,4
EPC 74	1994	1 312	132	6,5	6,5	6,6	2,3	7,1	1,2	0,3	8,4
EPC 74	1995	1 500	163	3,5	5,2	2,7	1,5	3,6	0,8	0,1	3,5
EPC 74	1996	1 350	174	3,9	5,5	3,2	1,2	4,3	1,6	0,1	5,2
EPC 74	1997	1 410	121	3,4	5,4	3,1	1,6	4,2	0,6	0,1	4,0
EPC 74	1998	1 293	105	3,2	4,3	2,8	1,5	3,5	0,3	0,1	3,4
EPC 87	1993	1 493	130	5,8	8,0	13,8	7,8	6,4	1,4	1,0	5,5
EPC 87	1994	1 910	166	4,2	8,3	18,6	11,3	5,7	2,0	1,8	5,9
EPC 87	1995	1 686	131	3,6	6,5	16,5	9,1	5,3	2,1	1,1	3,3
EPC 87	1996	1 294	115	3,2	5,3	14,6	8,4	3,9	1,5	0,9	6,8
EPC 87	1997	1 445	116	3,2	5,7	15,2	8,5	4,2	1,8	1,0	4,2
EPC 87	1998	1 586	99	3,5	5,9	17,1	9,9	5,3	1,7	1,2	4,6
HET 30	1993	2 401	291	7,6	20,2	17,6	11,4	12,5	1,4	2,0	16,1
HET 30	1994	2 921	234	6,7	14,6	20,6	13,2	9,1	2,2	2,4	19,2
HET 30	1995	2 718	612	7,7	17,0	24,1	15,2	9,3	2,7	1,7	7,9
HET 30	1996	4 605	524	10,7	24,1	36,3	22,0	11,4	3,3	2,7	27,1
HET 30	1997	2 402	285	4,8	11,2	14,3	8,4	5,5	1,3	0,7	7,5
HET 30	1998	1 549	171	4,1	8,1	13,0	8,1	5,3	0,7	1,0	4,7

Station	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
HET 54	1993	828	107	3,4	5,7	5,1	2,6	6,6	1,5	0,4	3,7
HET 54	1994	943	112	3,9	5,9	5,4	2,7	6,5	1,5	0,4	4,3
HET 54	1995	1 121	130	4,9	7,0	6,2	3,1	7,3	1,8	0,6	3,5
HET 54	1996	788	131	4,0	5,0	4,4	2,2	5,1	0,9	0,2	3,1
HET 54	1997	936	68	3,2	4,4	4,9	2,6	4,4	1,5	0,4	5,2
HET 54	1998	934	56	3,5	4,6	7,2	3,8	5,1	2,6	0,7	4,1
HET 64	1993	1 289	186	4,5	11,2	18,1	11,3	7,9	1,0	1,6	7,5
HET 64	1994	1 528	228	4,2	11,7	32,0	20,1	5,6	1,9	2,6	7,5
HET 64	1995	1 273	103	3,8	8,5	23,2	14,0	5,1	1,4	1,9	6,6
HET 64	1996	1 518	235	4,3	10,3	41,8	25,1	7,4	1,8	3,1	6,4
HET 64	1997	1 337	107	3,4	7,7	16,3	9,7	3,9	1,2	1,2	6,8
HET 64	1998	1 323	105	3,8	8,6	30,2	17,6	5,5	1,1	2,3	6,1
PL 20	1993	1 461	43	3,7	10,9	81,5	46,0	4,8	5,0	7,3	25,0
PL 20	1994	1 425	125	3,1	8,9	67,5	40,5	1,7	2,9	5,7	10,5
PL 20	1995	1 597	199	4,2	11,8	112,7	64,0	5,1	5,2	8,2	9,9
PL 20	1996	1 963	123	4,7	10,8	76,4	45,4	6,4	3,7	6,4	16,5
PL 20	1997	1 422	93	2,9	8,6	92,9	51,1	2,3	3,8	6,8	7,9
PL 20	1998	1 469	142	4,7	10,2	71,4	40,9	4,4	2,4	5,5	10,7
PM 17	1993	749	56	2,1	7,4	69,4	41,0	4,6	2,4	5,3	7,6
PM 17	1994	1 149	134	2,4	7,9	77,8	47,0	0,9	2,4	5,8	6,0
PM 17	1995	811	133	2,3	7,3	75,2	41,6	1,4	2,6	5,1	5,3
PM 17	1996	635	91	1,9	4,6	41,5	24,5	1,6	1,4	3,0	4,0
PM 17	1997	787	84	2,2	5,8	53,0	29,6	1,5	2,5	3,7	4,6
PM 17	1998	796	101	2,3	6,8	65,5	38,3	1,6	1,8	4,7	5,6
PM 40	1993	1 001	84	3,0	7,4	17,9	11,9	5,0	1,3	1,4	5,3
PM 40	1994	969	82	2,4	6,5	25,5	16,0	3,3	2,3	2,3	6,1
PM 40	1995	884	109	2,5	5,0	15,9	9,4	2,7	1,0	1,3	4,3
PM 40	1996	982	161	2,9	6,4	28,7	17,4	3,4	1,7	2,1	4,3
PM 40	1997	1 105	131	2,6	5,8	17,0	10,3	2,6	0,9	1,1	4,2
PM 40	1998	959	71	2,5	5,4	21,3	12,6	3,4	1,4	1,7	4,7
PM 72	1993	770	75	3,1	6,1	10,9	6,7	6,7	1,3	0,8	3,6
PM 72	1994	1 086	75	2,8	5,4	14,2	8,7	4,8	1,6	1,2	3,8
PM 72	1995	879	49	2,9	5,0	15,5	8,6	4,3	1,3	1,3	4,4
PM 72	1996	588	29	1,8	2,9	8,8	5,3	3,3	1,2	0,8	2,8
PM 72	1997	671	28	1,8	2,8	10,0	5,7	3,1	0,9	0,8	2,3
PM 72	1998	821	36	1,9	3,6	13,0	7,8	3,9	0,9	1,0	2,3

Station	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
PM 85	1993	715	6	2,0	8,5	93,2	53,6	2,7	2,5	8,2	19,6
PM 85	1994	978	19	1,7	6,8	75,6	43,7	1,1	3,9	6,9	15,4
PM 85	1995	788	16	2,0	7,2	85,9	44,8	1,7	4,0	6,8	13,7
PM 85	1996	743	28	1,9	6,1	71,7	42,5	2,5	2,3	5,9	7,8
PM 85	1997	691	28	1,6	5,3	61,4	34,8	1,4	2,0	4,8	6,3
PM 85	1998	743	28	1,6	6,8	89,5	51,9	1,9	2,6	6,8	7,6
PS 44	1993	798	70	1,7	5,9	37,3	22,0	4,3	1,5	2,8	3,2
PS 44	1994	1 061	107	1,9	6,2	39,8	23,9	1,6	2,1	3,8	4,4
PS 44	1995	1 142	88	2,7	7,0	55,9	29,4	4,2	2,4	4,3	3,9
PS 44	1996	738	62	2,2	4,7	28,0	16,0	3,4	1,3	2,6	4,7
PS 44	1997	784	64	2,0	4,6	25,8	14,3	3,4	1,2	1,8	2,3
PS 44	1998	947	76	2,2	6,2	40,9	23,7	3,7	1,6	3,8	3,5
PS 67	1993	752	114	4,4	6,7	4,9	2,4	7,4	1,9	0,7	4,9
PS 67	1994	864	147	4,2	6,4	5,1	3,5	5,9	1,2	0,5	4,8
PS 67	1995	962	127	4,5	6,4	4,5	2,5	6,4	1,4	0,5	3,7
PS 67	1996	712	152	3,8	4,8	3,5	1,9	4,3	0,7	0,2	2,7
PS 67	1997	777	78	3,1	4,0	3,8	2,1	4,4	1,2	0,3	3,3
PS 67	1998	754	101	2,9	3,4	4,2	2,1	3,3	0,8	0,3	2,4
PS 76	1993	959	172	3,8	9,1	24,3	14,4	5,6	1,7	2,0	4,3
PS 76	1994	1 162	143	3,8	9,2	27,2	16,0	5,8	2,0	1,8	4,8
PS 76	1995	864	137	4,0	9,2	26,1	14,6	4,7	2,8	2,0	5,4
PS 76	1996	713	135	3,2	6,9	22,5	13,7	4,3	1,5	1,4	3,3
PS 76	1997	775	98	2,8	6,1	13,1	7,7	4,0	1,1	0,8	3,1
PS 76	1998	1 065	131	3,6	8,4	35,8	21,6	4,8	1,4	2,6	5,3
SP 05	1993	856	6	1,7	4,6	3,5	1,6	4,1	1,3	0,9	19,9
SP 05	1994	1 168	29	2,1	6,6	3,0	1,7	1,6	1,0	1,0	15,0
SP 05	1995	1 100	24	2,6	4,8	9,2	2,1	2,8	1,3	1,1	21,0
SP 05	1996	1 127	33	2,2	5,5	3,5	1,3	2,5	1,1	0,6	13,8
SP 05	1997	932	37	1,7	4,6	3,3	1,5	2,0	1,2	0,6	8,8
SP 05	1998	861	11	1,8	5,5	3,5	1,7	2,6	1,2	0,9	12,0
SP 11	1993	998	98	3,1	6,6	5,7	3,6	5,5	0,8	0,6	11,2
SP 11	1994	1 074	123	2,3	5,6	7,0	4,9	2,3	0,9	0,6	5,7
SP 11	1995	1 258	87	3,2	6,5	9,7	4,6	4,0	1,1	1,1	6,8
SP 11	1996	1 511	162	3,3	6,1	11,8	5,6	3,7	0,9	1,0	5,9
SP 11	1997	818	44	2,2	4,1	5,0	2,7	2,4	0,7	0,5	5,8
SP 11	1998	1 177	100	2,8	5,2	11,6	5,0	3,8	0,9	1,2	4,7

Station	Année	Pluie	H	N-NO ₃	S-SO ₄	Cl	Na	N-NH ₄	K	Mg	Ca
SP 25	1993	1 567	135	4,1	7,8	5,8	3,4	7,1	0,6	0,4	9,2
SP 25	1994	1 645	107	4,0	6,3	5,3	4,2	4,9	1,0	0,5	10,5
SP 25	1995	1 891	164	4,7	6,4	5,0	3,7	5,4	0,5	0,3	4,3
SP 25	1996	1 474	190	4,4	5,8	4,8	2,9	4,9	0,3	0,1	5,5
SP 25	1997	1 618	96	3,5	4,6	5,6	3,3	4,8	0,8	0,2	4,8
SP 25	1998	1 410	119	3,6	4,6	6,0	4,0	4,6	0,7	0,5	4,1
SP 38	1993	1 368	93	3,8	7,4	4,7	2,5	4,1	1,3	0,4	9,7
SP 38	1994	1 510	166	3,4	5,9	2,7	1,8	2,8	0,8	0,2	5,7
SP 38	1995	1 738	206	4,4	6,4	3,7	2,4	3,9	0,8	0,4	4,7
SP 38	1996	1 493	238	5,2	6,7	3,0	1,4	5,2	0,5	0,1	5,1
SP 38	1997	1 184	114	2,6	4,0	2,7	1,7	2,7	0,8	0,1	3,1
SP 38	1998	1 403	120	3,3	4,7	3,2	2,0	3,5	0,5	0,2	5,6
SP 57	1993	1 307	244	4,9	8,0	6,0	3,5	6,2	1,5	0,4	3,7
SP 57	1994	1 425	202	6,2	9,6	8,0	4,8	11,0	4,1	1,3	7,7
SP 57	1995	1 688	250	7,4	10,5	9,4	5,2	13,1	3,9	0,8	6,1
SP 57	1996	1 067	232	4,9	6,0	5,6	3,0	5,5	0,6	0,2	2,5
SP 57	1997	1 280	137	4,0	4,7	5,2	2,9	5,1	1,2	0,3	3,5
SP 57	1998	1 326	161	4,6	5,5	7,6	4,3	5,5	1,1	0,5	2,7
SP 68	1993	1 181	124	3,6	5,9	5,2	3,1	5,1	1,0	0,3	2,5
SP 68	1994	1 419	157	3,5	5,4	5,4	3,4	4,0	1,6	0,2	2,9
SP 68	1995	1 693	165	4,0	6,1	6,2	3,4	4,8	1,6	0,3	2,0
SP 68	1996	1 105	146	3,8	4,9	4,3	2,2	4,4	0,9	0,1	2,0
SP 68	1997	1 394	111	3,1	4,2	5,1	2,8	3,6	1,0	0,2	3,0
SP 68	1998	1 515	143	3,6	4,9	7,5	4,3	4,4	0,9	0,6	3,1

The background of the cover is a solid olive green. It is decorated with two large, organic, wavy shapes in a light blue color. One shape is located in the upper right quadrant, and the other is in the lower left quadrant. They appear to be stylized representations of water or landmasses.

Adresses
des implantations
de l'ADEME



Les implantations de l'ADEME

Centre d'Angers :

2, square Lafayette - BP 406
49004 Angers Cedex
Tél. : 02 41 20 41 20 - Fax : 02 41 87 23 50

Centre de Valbonne :

500, route des lucioles
06560 Valbonne
Tél. : 04 93 95 79 00 - Fax : 04 93 65 31 96

Centre de Paris-Vanves : (siège social)

27, rue Louis-Vicat
75737 Paris Cedex 15
Tél. : 01 47 65 20 00 - Fax : 01 46 45 52 36

Bureau de Bruxelles :

53, avenue des arts
1000 Bruxelles
Tél. : 322 545 11 41 - Fax : 322 545 11 44



Délégations régionales

ALSACE :

8, rue Adolphe-Seyboth
67000 Strasbourg
Tél. : 03 88 15 46 46 - Fax : 03 88 15 46 47

AQUITAINE :

6, quai de Paludate
33080 Bordeaux Cedex
Tél. : 05 56 33 80 00 - Fax : 05 56 33 80 01

AUVERGNE :

63, boulevard Berthelot
63000 Clermont-Ferrand
Tél. : 04 73 31 52 80 - Fax : 04 73 31 52 85

BASSE-NORMANDIE :

Le Pentacle, avenue de Tsukuba
14209 Hérouville-Saint-Clair Cedex
Tél. : 02 31 46 81 00 - Fax : 02 31 46 81 01

BOURGOGNE :

Le Mazarin - 10, avenue Foch - BP 1042
21025 Dijon Cedex
Tél. : 03 80 76 89 76 - Fax : 03 80 76 89 70

BRETAGNE :

33, boulevard Solférino - BP 196
35004 Rennes Cedex
Tél. : 02 99 85 87 00 - Fax : 02 99 31 44 06

CENTRE :

22, rue d'Alsace-Lorraine
45058 Orléans Cedex 1
Tél. : 02 38 24 00 00 - Fax : 02 38 53 74 76

CHAMPAGNE-ARDENNE :

116, avenue de Paris
51038 Châlons-en-Champagne Cedex
Tél. : 03 26 69 20 96 - Fax : 03 26 65 07 63

CORSE :

Parc Sainte-Lucie immeuble Le Laetitia - BP 159
20178 Ajaccio Cedex 1
Tél. : 04 95 10 58 58 - Fax : 04 95 22 03 91

FRANCHE-COMTÉ :

25, rue Gambetta - BP 26367
25018 Besançon Cedex 6
Tél. : 03 81 25 50 00 - Fax : 03 81 81 87 90

HAUTE-NORMANDIE :

Les Galées du roi - 30, rue Gadeau-de-Kerville
76000 Rouen
Tél. : 02 35 62 24 42 - Fax : 02 35 63 38 69

ÎLE-DE-FRANCE :

6-8, rue Jean-Jaurès
92807 Puteaux Cedex
Tél. : 01 49 01 45 47 - Fax : 01 49 00 06 84

LANGUEDOC-ROUSSILLON :

Rédidence Antalya - 119, rue Jacques Cartier
34965 Montpellier Cedex 2
Tél. : 04 67 99 89 79 - Fax : 04 67 64 30 89

LIMOUSIN :

38 ter, avenue de la Libération
87000 Limoges
Tél. : 05 55 79 39 34 - Fax : 05 55 77 13 62

LORRAINE :

34, avenue André-Malraux
57000 Metz
Tél. : 03 87 20 02 90 - Fax : 03 87 50 26 48

MIDI-PYRÉNÉES :

Technoparc Bât. 9
rue Jean Bart - BP 672 - 31319 Labège Cedex
Tél. : 05 62 24 35 36 - Fax : 05 62 24 34 61

NORD-PAS-DE-CALAIS :

Centre tertiaire de l'Arsenal - 20, rue du prieuré
59500 Douai
Tél. : 03 27 95 89 70 - Fax : 03 27 95 89 71

PAYS DE LA LOIRE :

5, boulevard Vincent-Gâche - BP 16202
44262 Nantes Cedex 02
Tél. : 02 40 35 68 00 - Fax : 02 40 35 27 21

PICARDIE :

2, rue Delpech
80000 Amiens
Tél. : 03 22 45 18 90 - Fax : 03 22 45 19 47

POITOU-CHARENTES :

6, rue de l'Ancienne-Comédie - BP 452
86011 Poitiers Cedex
Tél. : 05 49 50 12 12 - Fax : 05 49 41 61 11

P A C A :

2, boulevard de Gabès
13008 Marseille
Tél. : 04 91 32 84 44 - Fax : 04 91 32 84 66

RHÔNE-ALPES :

10, rue des émeraudes
69006 Lyon
Tél. : 04 72 83 46 00 - Fax : 04 72 83 46 26

GUADELOUPE :

Café Center, rue Ferdinand-Forest
97122 Baie-Mahault
Tél. : 05 90 26 78 05 - Fax : 05 90 26 87 15

GUYANE :

28, avenue Léopold-Heder
97300 Cayenne
Tél. : 05 94 29 73 60 - Fax : 05 94 30 76 69

MARTINIQUE :

42, rue Garnier-Pagès
97200 Fort-de-France
Tél. : 05 96 63 51 42 - Fax : 05 96 70 60 76

RÉUNION :

Parc 2000 - 3, avenue Théodore-Drouhet - BP 380
97829 Le Port Cedex
Tél. : 02 62 71 11 30 - Fax : 02 62 71 11 31



Représentations territoriales

NOUVELLE-CALÉDONIE :

SME - BP 465 - 98845 Nouméa Cedex
Tél. : 00 (687) 27 39 44 - Fax : 00 (687) 27 23 45

POLYNÉSIE FRANÇAISE :

DAT - BP 115 - Papeete
Tél. : 00 (689) 46 84 51 - Fax : 00 (689) 46 84 49

SAINT-PIERRE-ET-MIQUELON :

DAF - 3, rue Aristide-Briand - BP 4244
97500 Saint-Pierre-et-Miquelon
Tél. : 00 (508) 41 19 80 - Fax : 00 (508) 41 19 85



Site internet : www.ademe.fr





Pour connaître...

... la réglementation française en matière de qualité de l'air :

Consultez le site Internet du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable :
<http://www.environnement.gouv.fr>

... la qualité de l'air dans votre ville :

Consultez les sites Internet des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air de votre région

... l'ensemble des indices ATMO du jour et les prévisions pour le lendemain :

Consultez le site Internet de l'ADEME, <http://www.ademe.fr> (rubrique Buld'air)

... les techniques de mesure des polluants atmosphériques :

Consultez le site Internet du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
<http://www.lcsqa.org>



Pour en savoir plus :

- *Le savoir-faire français en matière de surveillance de la qualité de l'air ambiant*
128 pages, réf. 4063 (gratuit).
- *La qualité de l'air dans les agglomérations françaises - Bilan 2000 de l'indice ATMO*
20 pages, réf. 4308 (gratuit).
- *L'Atlas de la surveillance de la qualité de l'air au 31 mars 2000*
36 pages, réf. 3610 (gratuit).
- *Retombées atmosphériques de métaux en France : estimation par dosage dans des mousses* - 284 pages, réf. 3196 (23 €).
- *La qualité de l'air en France en 1995-1996* - 268 pages, réf. 3043 (38 €).

Ces publications sont disponibles sur demande à

ADEME Éditions : 2, square La Fayette - 49004 Angers Cedex 01

- *La qualité de l'air en France 1996-2000 - Bilan et perspectives*

Édité par le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement et le Conseil national de l'air, disponible sur demande au MEDD, Bureau de la pollution atmosphérique
20, avenue de Ségur - 75007 Paris SP

- *Revue « Pollution atmosphérique »* - Périodique édité par l'APPA

10, rue Pierre Brossolette - 94270 Le Kremlin-Bicêtre - Tél. : 01 42 11 15 00



Pour connaître...

... Le Réseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes
FOrestiers (RENECOFOR) et son sous-réseau CATAENAT,
consultez le site Internet
<http://www.onf.fr/pro/renecofor/index.htm>

- la présentation du réseau,
- les sites d'observation,
- quelques résultats nationaux,
- les publications,
- les liens vers d'autres réseaux européens...

Retombées atmosphériques humides en France entre 1993 et 1998

Sites Internet

ADEME :
www.ademe.fr

ONF :
www.onf.fr

École des Mines de Douai :
www.ensm-douai.fr

Le présent ouvrage fait le point sur les mesures continues des retombées atmosphériques humides, réalisées par deux réseaux de surveillance regroupant 37 stations de mesure, entre 1993 et 1998.

Pour la première fois est présentée une information cohérente et harmonisée sur les concentrations et les quantités annuelles déposées par les précipitations, en France métropolitaine, pour neuf ions ou composés.

L'objectif des mesures des retombées atmosphériques humides est de contrôler l'impact des réductions des émissions et de connaître la quantité d'éléments acidifiants, eutrophisants ou nutritifs que les écosystèmes naturels reçoivent. Selon leur quantité, les retombées peuvent avoir un effet positif ou négatif sur le fonctionnement des écosystèmes.

© ADEME Éditions, Paris, 2002.
ISBN 2-86817-582-1

30 €



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie
Direction de l'Air et des Transports
Département Air
27, rue Louis-Victor - 75015 Paris
Tél. : 01 47 65 20 00 - Fax : 01 47 65 20 35



Office National des Forêts
Département Recherche et Développement
Boulevard de Constance
72900 Fontainebleau
Tél. : 01 60 74 92 29
Fax : 01 64 22 49 73



École des Mines de Douai
Département Chimie et Environnement
941, rue Charles Boursoul
BP 839 - 59508 Douai Cedex
Tél. : 03 27 71 26 36
Fax : 03 27 71 25 25