

## La qualité des eaux de pluie : acidité en baisse mais pas de progrès pour les dépôts d'azote

**La composition chimique des précipitations a été suivie de 1977 à 2009 sur trois stations du réseau de Météo-France. Sur la période étudiée, l'acidité baisse et s'approche du niveau naturellement observé dans les eaux de pluie. Les dépôts de sulfates, source d'acidité, diminuent jusque dans les années 90 puis se stabilisent. En revanche, les dépôts moyens de nitrates et d'ammonium, qui contribuent à la fois à l'acidification et à l'eutrophisation des écosystèmes, restent stables. En 2005, les surfaces d'écosystèmes dégradés par les précipitations acides en Europe sont en baisse par rapport aux années 80, toutefois, leur retour à un état initial peut encore être long.**

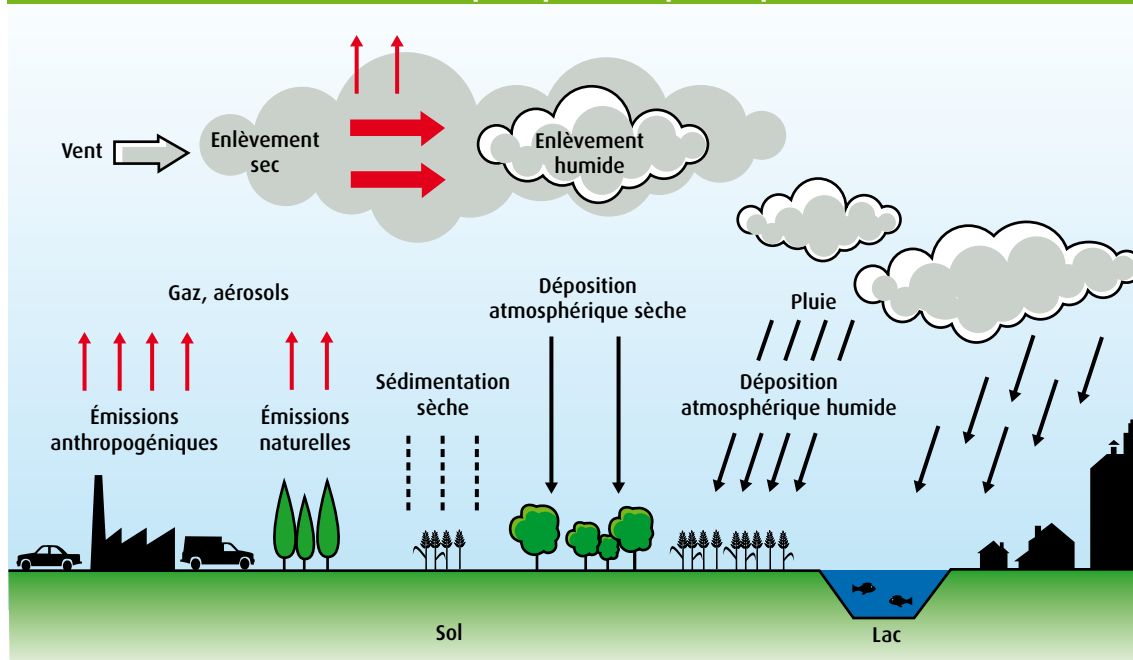
La pollution acide désigne les retombées au sol de composés acides ou acidifiants sous l'effet des vents et des précipitations. Elle est connue depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Son caractère transfrontalier est démontré à la fin des années 60 avec l'acidification des lacs et forêts scandinaves. La pollution acide peut impacter les forêts, les sols et les milieux aquatiques. Elle touche aussi les constructions et monuments, notamment en pierres calcaires.

Les substances contribuant aux retombées acides ou acidifiantes sont le plus souvent d'origine humaine comme la combustion énergétique et industrielle, le transport routier ou l'agriculture/sylviculture. Il s'agit du dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), des oxydes d'azote (NOx) et de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Une fois émis, ces polluants peuvent être transportés par le vent et les turbulences de l'air sur de plus ou moins longues distances. Une partie seulement de ces émissions va

conduire à la formation de composés acides ou acidifiants qui vont ensuite en partie se déposer dans l'environnement. Ces processus correspondent soit à une sédimentation ou à une diffusion de gaz ou de particules sur les milieux (dépôts secs), soit à un apport provenant des pluies, des brouillards, de la neige ou de la grêle (dépôts humides). Les forêts, notamment de résineux, de par leur feuillage abondant et persistant, contribuent à une captation accrue de ces dépôts secs acidifiants qui seront ensuite apportés aux sols lors du passage des précipitations.

De 1977 à 2009, Météo-France a suivi la composition chimique des précipitations sur trois stations : Abbeville dans la Somme, Carpentras dans le Vaucluse et Gourdon dans le Lot. Les mesures de ce réseau permettent d'établir un bilan sur plus de 30 ans de l'évolution de l'acidité des précipitations.

### Processus atmosphériques de dépôt des polluants



Source : Tiré de « Santé et pollution de l'air », Jean Martin, Lucien Yves Maestre, Presses polytechniques romandes, 1988, copyright PPR, Lausanne. Tous droits réservés.

## L'acidité des précipitations diminue

Les précipitations ont naturellement un pH acide compris entre 5 et 7 et sont considérées comme acides lorsque le pH est inférieur ou égal à 5,6. Sur les trois sites suivis, le pH moyen augmente entre 1980 et 2008. Si les précipitations restent acides, leur pH est systématiquement supérieur à 5,0 depuis 2005 et se rapproche du niveau naturellement observé dans les eaux de pluie. Cette tendance à la hausse du pH, et donc à la baisse de l'acidité, est également observée dans plusieurs pays de l'Europe occidentale.

Sur la station d'Abbeville, le pH augmente nettement sur la période de suivi. Ce site est le plus « acide » des trois sites étudiés, car davantage exposé aux masses d'air polluées régionales et à celles venant de l'Europe du Nord, fortement industrialisée et peuplée : Allemagne, Royaume-Uni, Belgique... Pour Carpentras, le pH croît légèrement entre 1996 et 2001. À Gourdon, le pH augmente

significativement. Ce site est le moins « acide » avec un pH supérieur ou égal à 5,0 depuis 1993. L'écart de pH entre les trois sites se resserre et converge vers une valeur comprise entre 5,1 et 5,3.

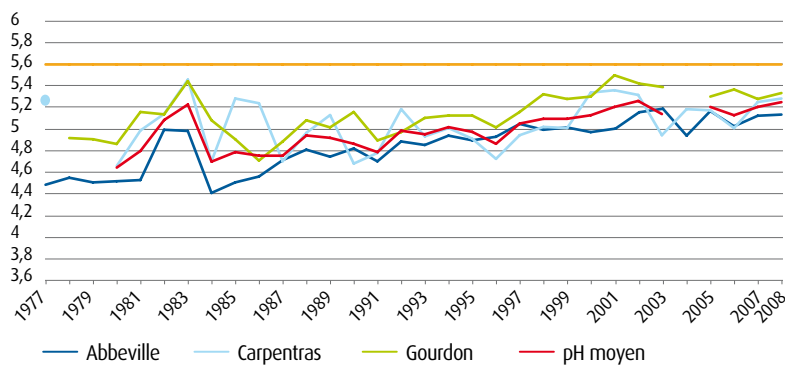
## Les dépôts de sulfates diminuent

Pour la période 1980-2008, les dépôts de sulfates baissent de 65 % en moyenne sur les trois stations de Météo-France. Ils diminuent notamment sur Abbeville jusqu'à la fin des années 90 et se stabilisent dans les années 2000 avec quelques fluctuations dues à la pluviométrie. En moyenne sur les quatre dernières années, les dépôts de sulfates exprimés en équivalent soufre sont de 3,74 kg/ha à Abbeville, 2,87 kg/ha à Carpentras et 3,82 kg/ha à Gourdon.

Cette tendance à la baisse des dépôts de sulfates est également observée au plan européen : - 40 % en Autriche entre 1984 et 1993 et - 61 % en Allemagne pour la période 1992-2000.

Les sulfates présents dans les précipitations peuvent être d'origine naturelle, marine principalement (de 7 à 19 % sur les sites étudiés). Toutefois, une part importante des sulfates est d'origine anthropique et est issue de l'oxydation du  $\text{SO}_2$  émis dans l'air en acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Le dioxyde de soufre est émis principalement par la combustion énergétique et industrielle. La réduction des émissions de  $\text{SO}_2$  dans l'air en France explique la baisse des dépôts de sulfates dans les précipitations. Elle est de 89 % entre 1980 et 2008 selon le Citepa. Elle résulte de la baisse des consommations d'énergie fossile suite à la mise en œuvre du programme électronucléaire, des actions visant à économiser l'énergie, de l'utilisation de combustibles moins soufrés, de l'utilisation de filtres, ainsi que de la désindustrialisation de l'économie

### Une augmentation du pH moyen sur l'ensemble de la période



Source : Météo-France – direction des systèmes d'observation (DSO), 2010.  
Traitements : Météo-France – DSO, 2011.

## La surveillance de la composition chimique des précipitations en France

Dès les années 50, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) contribue à la surveillance et à la recherche dans le domaine de l'environnement atmosphérique. Depuis 1989, elle coordonne dans le cadre du programme Veille de l'atmosphère globale (VAG), un réseau mondial de stations destinées notamment à fournir des informations sur le comportement de l'atmosphère, sa composition chimique et sur les interactions entre l'atmosphère, les océans et la biosphère.

Dans ce cadre, trois stations de prélèvement d'échantillons des précipitations situées à Abbeville, Carpentras et Gourdon ont été gérées par Météo-France de 1977 à 2009. Ce suivi a porté sur :

- la composition chimique des précipitations collectées de manière mensuelle de 1977 à 1983 puis hebdomadaire de 1984 à 2009 : pH, conductivité électrique, cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), acidité/alcalinité ;
- les hauteurs de précipitations ;
- les conditions météorologiques sur la période associée à chaque collecte.

En France, deux autres réseaux surveillent la qualité des précipitations :

- le réseau de Mesures des retombées atmosphériques (Mera) créé en 1984. Fin 2010, il s'appuie sur 9 stations avec un suivi journalier de la composition chimique des précipitations. Sa gestion technique est assurée par l'École des mines de Douai pour l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) ;
- le sous-réseau Charge acide totale d'origine atmosphérique dans les écosystèmes naturels terrestres (Cataenat) créé en 1992. Il compte 8 stations de mesure des dépôts humides hors couvert forestier assurant un suivi mensuel de la composition chimique des précipitations. Il est géré par l'Office national des forêts (ONF).

Pour ces deux derniers réseaux, les résultats de cette surveillance sont proches des évolutions moyennes constatées sur le réseau Météo-France : baisse de l'acidité sur quelques sites et le plus souvent un pH proche ou supérieur à 5,0 en fin de période, baisse des dépôts de sulfates pour la plupart des stations, pas de tendance pour les dépôts de nitrates. Pour l'ammonium, les dépôts baissent ou ne suivent pas d'évolution significative selon les stations.

française. La réduction des émissions des pays européens voisins de la France contribue aussi à la baisse des dépôts de sulfates en France.

### Les dépôts moyens d'azote sont stables

Les dépôts moyens de nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) fluctuent selon les années mais restent stables en tendance sur la période. Après avoir diminué en début de période, les dépôts de nitrates, exprimés en équivalent azote, observés en moyenne sur les quatre dernières années sont de 2,47 kg/ha à Abbeville. Ils sont du même ordre de grandeur à Gourdon (2,49 kg/ha) et légèrement inférieurs à Carpentras (2,04 kg/ha).

Dans l'atmosphère, les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) se transforment en acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ), qui participe à l'acidification des précipitations et à l'apport de nitrates. Les  $\text{NO}_x$  proviennent majoritairement des transports routiers et dans une moindre mesure des secteurs de l'agriculture/sylviculture et de l'industrie. Les émissions de  $\text{NO}_x$  baissent de 37 % entre 1980 et 2008 d'après le Citepa.

Entre 1980 et 2008, les dépôts moyens d'ammonium sont globalement stables, mais présentent une forte variabilité régionale. Ainsi, sur la même période, les dépôts d'ammonium baissent significativement à Abbeville alors qu'ils augmentent à Gourdon ainsi qu'à Carpentras surtout à la fin des années 80. En moyenne sur 2005-2008, les dépôts d'ammonium exprimés en équivalent azote sont de 3,93 kg/ha pour Abbeville, 1,82 kg/ha pour Carpentras et 3,71 kg/ha pour Gourdon.

L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est à l'origine de la présence d'ammonium dans les précipitations. Il est émis dans l'air majoritairement par le secteur de l'agriculture, principalement l'élevage. Il réagit dans l'atmosphère pour former des sels d'ammonium. Entre 1980 et 2008, les émissions de  $\text{NH}_3$  ne diminuent que de 4 % selon le Citepa. Les dépôts d'ammonium ne sont pas acides en tant que tels mais peuvent avoir un effet acidifiant au contact du sol en libérant des ions  $\text{H}^+$  par transformation en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) ou nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). De ce fait, ils ont également un effet eutrophisant sur les écosystèmes.

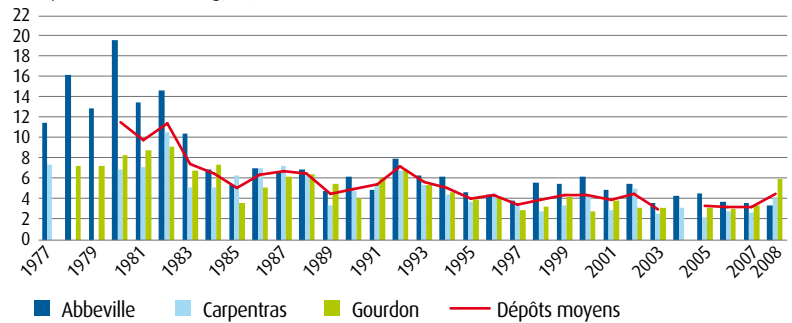
La composition chimique des précipitations est variée et ne se limite pas aux composés acides ou acidifiants. Les eaux de pluie contiennent notamment des ions sodium et chlorures d'origine marine. Les ions chlorures peuvent provenir également d'éruptions volcaniques mais aussi d'activités humaines telles que l'incinération des déchets ou l'industrie du papier. De plus, les précipitations contiennent des ions calcium, magnésium et potassium qui ont pour origine l'érosion éolienne des sols dépourvus de végétation.

### Des écosystèmes encore dégradés par les précipitations

Les précipitations favorisent l'acidification des écosystèmes, lorsqu'un dépôt de composés acides ou acidifiants excède la capacité neutralisante du milieu. Elles impactent plus particulièrement les milieux à faible capacité neutralisante. Les

## La diminution des dépôts de sulfates intervient pendant les années 80 et 90

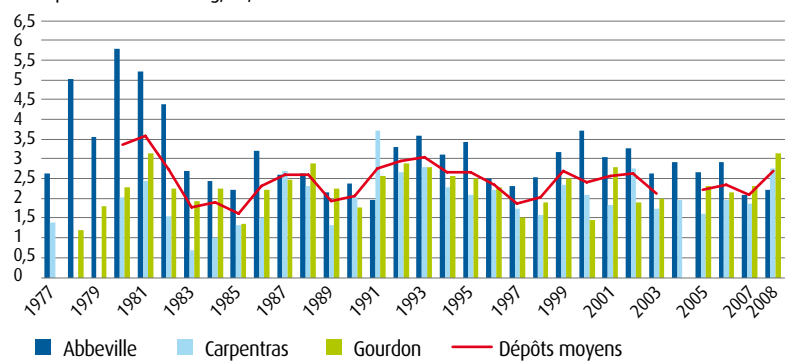
En équivalent soufre en kg/ha/an



Source : Météo-France – DSO, 2010. Traitements : Météo-France – DSO, 2011.

## Pas d'évolution significative des dépôts moyens de nitrates

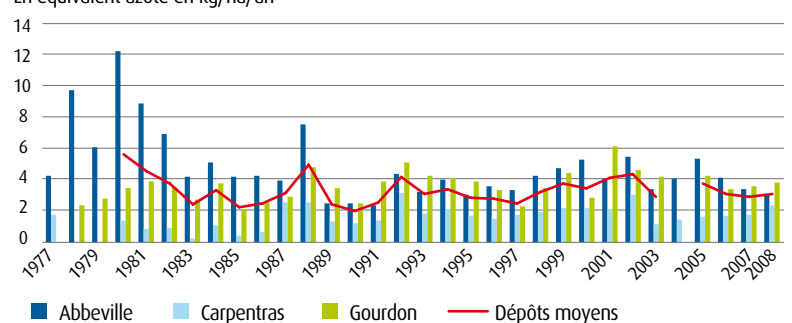
En équivalent azote en kg/ha/an



Source : Météo-France – DSO, 2010. Traitements : Météo-France – DSO, 2011.

## Des dépôts moyens d'ammonium globalement stables mais avec des différences locales

En équivalent azote en kg/ha/an



Source : Météo-France – DSO, 2010. Traitements : Météo-France – DSO, 2011.

précipitations acides ou acidifiantes modifient ainsi les équilibres chimiques des milieux naturels : cours d'eau, sources, lacs, sols, forêts. L'acidification des eaux est néfaste pour la faune et la flore aquatique. Elle appauvrit les sols en minéraux nécessaires à la nutrition des végétaux : calcium, potassium, magnésium, au profit des cations acides (protons, aluminium). L'acidification favorise le passage dans l'eau de métaux contenus dans les sols (aluminium) ou dans des matériaux (canalisation en plomb).

La **charge critique d'acidité** permet d'évaluer l'impact des précipitations acides ou acidifiantes sur les écosystèmes. Elle définit la quantité maximale de dépôts acidifiants qu'un écosystème peut supporter à long terme sans subir de dommages en l'état actuel des connaissances. La charge critique est calculée pour chaque type d'écosystème et varie géographiquement. En Europe, les dépassements des charges critiques d'acidité étaient estimés à plus de 15 % des surfaces en 1985. En 2005, la situation s'est nettement améliorée, suite à la baisse des émissions et des dépôts de polluants acides. Ainsi, à cette date, 8 % des écosystèmes européens seraient concernés par des dépassements des charges critiques d'acidité, localisés essentiellement dans les pays de l'Europe septentrionale (Suède, Finlande...). En France, ces dépassements sont estimés à 10 %. Les régions les plus touchées sont les Vosges, les Ardennes et les Landes. Pour les zones où la charge critique d'acidité a été dépassée, plusieurs décennies seront nécessaires pour que certains écosystèmes dégradés retrouvent leur état initial. De plus, les écosystèmes dont la charge critique est toujours dépassée ne sont pas en voie de restauration.

La charge critique est un outil d'aide à la décision qui vise notamment à guider les politiques de réduction des émissions. Dans le cadre du protocole de Göteborg relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique dit « multi-polluants/multi-effets » signé le 1<sup>er</sup> décembre 1999, la France doit respecter des plafonds d'émissions pour 2010. Les seuils fixés pour le dioxyde de soufre et l'ammoniac devraient être respectés, compte tenu des niveaux déjà atteints en 2009 et des mesures et réglementations déjà adoptées. En revanche, pour les oxydes d'azote, le seuil d'émission fixé pour 2010 devrait être dépassé. Pour certains territoires, les plafonds d'émissions actuels ne peuvent assurer la restauration des écosystèmes dégradés, et une révision du protocole est en cours.

## Méthodologie

Les principaux paramètres caractérisant l'acidité des précipitations (pH, sulfates, nitrates, ammonium) ont été examinés sur la période 1977-2008 pour les stations d'Abbeville, Carpentras et Gourdon du réseau de Météo-France. Les résultats sont exprimés en dépôts humides en kg/ha/an : masse d'un composé chimique amenée par les précipitations par unité de surface et de temps. Les dépôts de sulfates sont exprimés en équivalent soufre et les dépôts de nitrates et d'ammonium en équivalent azote. Les dépôts annuels moyens sont calculés à partir des dépôts annuels des trois sites par une moyenne arithmétique. L'étude des données Mera et Cataenat sur la période commune aux trois réseaux (1993-2007) a permis de compléter les tendances observées sur les trois stations de Météo-France. Le test statistique de Mann-Kendall a été utilisé pour détecter la présence de tendances linéaires significatives à long terme pour les différents paramètres étudiés. Il a été associé au test statistique de Sen qui permet de calculer la pente de la tendance détectée. Les données d'émissions sont issues de l'inventaire au format Secten du Citepa. Le calcul des charges critiques est assuré par un réseau européen dont le point focal pour la France est hébergé par le laboratoire

EcoLab, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, unité mixte de recherche du CNRS, de l'université Paul Sabatier - Toulouse III et de l'Institut national polytechnique de Toulouse. Il nécessite un classement des écosystèmes qui prend en compte de nombreuses données : végétation, pédologie, géologie, climat, minéralogie.

## Quality of rainwater: lower acidity but no progress on nitrogen deposition

*The chemical composition of precipitation has been monitored between 1977 and 2009 at three stations in the Météo-France network. Over the study period, acidity has reduced and is approaching that observed naturally in rainwater. Sulphate deposition, the source of acidity, reduced until the 1990s and then stabilised. Conversely, average deposition of nitrates and of ammonium, which contribute both to acidification and to eutrophication of ecosystems, remain stable. In 2005, the area of ecosystems degraded by acid precipitation in Europe was lower than in the 1980s. However, return to their initial condition may still take a long time.*

### Pour en savoir plus :

- Citepa, avril 2011. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Séries sectorielles et analyses étendues : <http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm#inv1>
- EcoLab, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, accueille le point focal national chargé de la modélisation des charges critiques atmosphériques en France pour une intégration à l'échelle européenne : <http://www.ecolab.ups-tlse.fr/spip.php?rubrique108>
- Observation des pollutions atmosphériques de fond et longue distance (regroupe des informations sur différents réseaux de mesures de pollution à longue distance et notamment sur les réseaux Météo-France GAW/BAPMoN, Mera et Cataenat) <http://www.opal.ademe.fr/pages/public/index.php>
- Pierre Sicard, 2006. Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosols. Analyse des tendances spatio-temporelles et des séries chronologiques. Thèse. 425 p. [http://cdoc.ensm-douai.fr/theses/Pierre\\_Sicard.pdf](http://cdoc.ensm-douai.fr/theses/Pierre_Sicard.pdf)
- Programme « Veille de l'atmosphère globale » de l'Organisation météorologique mondiale : [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw\\_home\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html)

**Auréli Le Moullec, SOEs.  
Abdelkrim Mezdoor, Météo-France.**



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat  
Prévention des risques  
Développement durable  
Infrastructures, transports et mer

Présent  
pour  
l'avenir

le  
point sur

Commissariat général  
au développement  
durable

Service de l'observation  
et des statistiques

Tour Voltaire  
92055 La Défense cedex  
Tél. : (33/0) 1 40 81 13 15  
Fax : (33/0) 1 40 81 13 30

Directeur de la publication :  
Bruno Trégouët  
Rédacteur en chef :  
Bruno Trégouët

Coordination éditoriale :  
Corinne Boitard

Conception et réalisation :

FROMATIQUES ÉDITIONS  
Impression : Bialec, Nancy  
(France), utilisant du papier  
issu de forêts durablement  
gérées.

ISSN : 2100-1634

Dépôt légal : juin 2011