

Résumé

Motivé par l'absence de carte de dépôts atmosphérique à l'échelle de la France, l'objectif de cette étude est de proposer deux démarches indépendantes (modélisation déterministe et modélisation stochastique ou géostatistique) pour estimer la distribution spatiale (et les incertitudes associées) des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier en France. Ceci est fait à l'aide des données acquises sur le réseau CATAENAT entre 1993 et 1998, puis en utilisant les données de pluviosité de 2614 stations Météo-France pendant la même période. Les cartes produites ont été comparées aux cartes EMEP à l'échelle de l'Europe et une amorce de discussion sur les charges critiques d'acidité est abordée.

Contrairement à d'autres types de modélisation des dépôts atmosphériques tels que les modèles EMEP (European Monitoring and Evaluation Program), la modélisation déterministe permet d'estimer les dépôts totaux hors couvert forestier avec très peu de variables explicatives : les précipitations, l'altitude et la période dans l'année. La simplicité de ces modèles est associée à une qualité satisfaisante des estimations ; entre 38 % et 64 % de la variabilité des dépôts est expliquée par les modèles pour S-SO₄, Cl, Na, Mg, N-NO₃, N-NH₄, N_{tot} et H⁺. L'estimation des dépôts annuels en un point donné est finalement réalisée entre ±1 et 3 kg/ha/an pour S-SO₄, N-NH₄, N-NO₃, N_{tot} et Mg, et entre ±60 eq/ha/an pour H⁺. Dans le cas de Na et Cl, cette estimation est réalisée respectivement entre ±3 et 6 kg/ha/an en dehors de la frange littorale atlantique, et entre ±17 et 30 kg/ha/an pour la frange littorale atlantique. Ces modèles développés pour les années 1993 à 1998 ont été testés par rapport aux mesures réalisées en 1999. On observe pour les plus faibles dépôts une surestimation par les modèles de l'ordre de 30 % dans le cas de S-SO₄ et de l'ordre de 100 % dans le cas de H⁺. Pour les autres ions, les dépôts modélisés sont généralement proches des dépôts mesurés mis à part pour Cl, Na et Mg à proximité immédiate de l'atlantique. Dans le domaine de validité des modèles (hors zones industrielles et grandes agglomérations, et altitudes inférieures à 1400 m), on observe une répartition spatiale des dépôts qui oppose souvent les régions à dépôts importants situées dans les zones à forte pluviosité à des régions à dépôts plus faibles liées à des pluviosités plus faibles (S-SO₄, N_{tot}, N-NH₄, N-NO₃ et H⁺). Pour Na, Cl et Mg, l'origine essentiellement marine de ces ions conduit à une répartition nettement différente des dépôts. La frange littorale atlantique, la Manche et la Corse présentent des dépôts importants tandis que dans le reste du pays les dépôts sont nettement plus faibles. La comparaison de nos cartes avec les cartes EMEP (en 1995 et 1997) montre une bonne cohérence des valeurs annuelles moyennes à l'échelle de la France, mais des divergences plus ou moins fortes selon les ions apparaissent dans les répartitions spatiales des dépôts. Ces écarts résultent vraisemblablement à la fois des résolutions spatiales nettement différentes : 150 km * 150 km (1995) ou 50 km * 50 km (1997) pour EMEP et 15 km * 15 km pour nos cartes et de la prise en compte ou non des émissions de polluants et des transformations chimiques dans l'atmosphère.

L'approche géostatistique a conduit à des résultats satisfaisants, malgré le petit nombre (27) de sites de mesures du réseau CATAENAT. Des comportements spatiaux structurés ont été identifiés et quantifiés pour l'ensemble des ions étudiés. Ils ont ensuite été ajustés à l'aide de modèles de variogrammes et de variogrammes croisés qui ont permis la réalisation d'interpolation multivariable par cokrigage à l'aide des données d'une variable auxiliaire : la pluviosité fournie par Météo-France sur 2614 stations. La contribution de cette variable auxiliaire évaluée par validation croisée, est significative pour la majorité des interpolations réalisées. Les cartes issues de cette approche donnent une image globalement comparable des dépôts à l'échelle de la France aux cartes obtenues par modélisation déterministe. Pour S-SO₄, N-NH₄ et N-NO₃ l'approche déterministe tend cependant à surestimer de 7 % à 11 % en moyenne les dépôts par rapport à l'approche géostatistique, alors qu'elle conduit à une sous estimation de 17 % à 24 % pour Na, Cl, Mg et H⁺. Les dépôts les plus forts sont généralement localisés de manière comparable par les deux approches avec l'exception de N-NH₄ et N-NO₃ au niveau de la frange Nord Est qui est décrite comme une région à forts dépôts par l'approche géostatistique alors que l'approche déterministe conduit à des valeurs dans la moyenne. Des développements de cette approche géostatistique peuvent être envisagés selon deux axes principaux. La cartographie des dépôts pourrait être améliorée en appliquant la méthode de dérive externe avec des variables corrélées aux dépôts mais enregistrées sur d'autres sites que les sites CATAENAT. La question des dépassements de seuils (les charges critiques) pourrait trouver des éléments de réponse dans les méthodes géostatistiques de simulations conditionnelles.

A défaut d'avoir été évalué précisément, les dépassements des charges critiques d'acidité ("exceedances") ont été appréciés en comparant nos cartes de dépôts à la carte des charges critiques d'acidité proposée par la France, ainsi que par rapport à des valeurs seuils plus générales développées au niveau européen pour la France. Il semble que les dépassements des charges critiques d'acidité en France correspondent à des situations locales particulières (Vosges, bordure ouest du Massif Central et Landes), mais des études complémentaires sont encore nécessaires pour préciser certains paramètres intégrés dans l'évaluation des "exceedances".

En tout état de cause, ces premières évaluations ne doivent pas conduire à des conclusions trop optimistes étant donné que les dépôts totaux sous couvert forestier sont le plus souvent supérieurs d'au moins 20 à 30 % aux dépôts totaux hors couvert forestier. Les dépassements des charges critiques d'acidité restent finalement un risque qu'il convient de ne pas sous-estimer en France et dont le suivi au cours du temps est indispensable.

Abstract

To date, no map of atmospheric deposition was available for France. The objective of this work is to propose two independent approaches (deterministic and Geostatistical models) to appraise the spatial pattern of atmospheric deposition and the associated uncertainties. Data from the sub-network CATAENAT for the period 1993 to 1998 were used as well as precipitation data from 2,614 Météo-France stations to elaborate these models. Maps produced were compared with EMEP maps for Europe and a first discussion about critical loads is presented.

Unlike other models such as EMEP (European Monitoring and Evaluation Program), the deterministic models developed here allow bulk deposition mapping using only a few explanatory variables (precipitation, altitude and period in the year). The simplicity of these models is combined with a satisfactory quality of the estimations. The models explain between 38 % and 64 % of the variability of the deposition for S-SO₄, Cl, Na, Mg, N-NO₃, N-NH₄, N_{tot} and H⁺. Estimates of annual deposition for a given point are obtainable with an accuracy of between ±1 and 3 kg/ha/year for S-SO₄, N-NH₄, N-NO₃, N_{tot}, and Mg, and of ±60 eq/ha/year for H⁺. For Na and Cl, these estimates are between ±3 and 6 kg/ha/year respectively outside of the Western coastal zone, and between ±17 and 30 kg/ha/year inside the coastal zone. Comparisons conducted in 1999 between observed and modelled deposition show an overestimation by the models for the smaller deposition values (about 30 % for S-SO₄ and 100 % for H⁺). For the other compounds (N-NO₃, N-NH₄, N_{tot}, Cl, Na and Mg), the modelled deposition is generally close to the measured values, excepted for the last 3 compounds near the sea. In the validity field of the models (outside heavy emission zones: i.e. industrial areas and large towns, and at altitudes below 1400 m), the spatial distribution of the atmospheric deposition often emphasises an opposition between regions with high atmospheric deposition and high precipitation and regions with low atmospheric deposition and low precipitation. This is observed for S-SO₄, N_{tot}, N-NH₄, N-NO₃ and H⁺. For Na, Cl and Mg, the marine origin of these compounds produces a clearly different geographical pattern. Close to the Atlantic coast and Corsica, atmospheric deposition is very important while in the rest of the country, the values are a lot smaller. Comparison of maps based on either the deterministic approach or EMEP (1995 and 1997) shows good agreement between means at the country level. However spatial differences occur for some compounds. These differences can likely be explained by the very different spatial resolutions for EMEP (150 km * 150 km or 50 km * 50 km) and for our work (15 km * 15 km) as well as by the fact that pollutant emissions and chemical transformations in the atmosphere are or are not taken into account.

The Geostatistical approach leads to satisfactory results in spite of the small number (27) of stations in the sub-network CATAENAT. Spatially structured behaviours were identified and quantified for all the compounds. They were fitted with variogram and cross variogram models. Multivariate interpolation by cokriging was achieved with an auxiliary variable (precipitation on 2,614 Météo France stations). The contribution of this variable evaluated by cross validation appears to be significant for most of the interpolations. The maps produced are globally close to those obtained with the deterministic approach. However, the deterministic approach overestimates bulk deposition for S-SO₄, N-NH₄ and N-NO₃ (7 % to 11 %), and underestimates bulk deposition for Na, Cl, Mg and H⁺ (17 % to 24 %). Generally, the localisation of regions with higher deposition is similar for both modes except for N-NH₄ and N-NO₃ in the north-eastern part of France which is described as a region with high levels of deposition by the Geostatistical approach and as a region with values near the mean values by the deterministic approach. Further developments of the Geostatistical approach are possible. Mapping of bulk deposition can be improved by using the external drift technique and conditional simulations would also answer the question of exceedance of critical levels for acidity.

In the absence of a precise evaluation of exceedances, we compared our bulk deposition maps with existing critical load maps for France and with thresholds of critical loads depending on the susceptibility of the environment. It appears that exceedance of critical loads in France is restricted to limited areas (the Vosges, the western part of the Massif Central and the Landes). However, complementary studies are needed to better assess some of the parameters included in the term "exceedance".

In all cases, these first assessment do not appear to be particularly optimistic regarding the problem of atmospheric pollution. In fact, bulk depositions are often 20 % to 30 % below throughfall deposition and currently our knowledge is limited on this ratio and the main sources of variability. The exceedance of critical loads for acidity remains a risk which should not be underestimated in France. Therefore, continued monitoring is absolutely necessary.

Zusammenfassung

Die Titel der Graphiken und Tabellen wurden im Text ins Englische übersetzt

Frankreich hatte bis vor kurzem keine landesweiten Karten für atmosphärische Depositionen. Das Ziel der aktuellen Studie ist es zwei unabhängige Ansätze zur Modellierung der räumlichen Verteilung der Freilanddepositionen („bulk“) vorzustellen. Es handelt sich um einen empirischen und einen stochastischen und géostatistischen Ansatz. Dafür wurden die Daten 1993-1998 des Messnetzes CATAENAT (ein Teil des RENECOFOR-Messnetzes) und in einem weiteren Schritt die Niederschläge von 2614 Stationen der französischen meteorologischen Anstalt Météo-France für die gleiche Periode verwendet. Die produzierten Karten wurden mit den EMEP-Karten, die für Europa erstellt wurden, verglichen. Weiters wurde ein Ansatz einer Diskussion in Vergleich mit den „critical loads“ gemacht.

Verglichen mit anderen bereits existierenden Modellen, wie z.B. das EMEP-Modell (European Monitoring and Evaluation Program), ermöglicht das empirische Modell die Freiland-Bulkdepositionen mit nur sehr wenigen Variablen zu schätzen: Niederschlag, Meereshöhe und die Periode innerhalb des Jahres. Die Einfachheit dieser Modelle ist zudem mit einer zufriedenstellenden Qualität der Schätzung verbunden: zwischen 38% und 64% der Varianz kann für folgende Ionen erklärt werden: S-SO₄, Cl, Na, Mg, N-NO₃, N-NH₄, N_{tot} und H⁺. Die Schätzung der Jahresdepositionen an einem Punkt kann mit dem empirischen Modell mit einem Fehler von ± 1 bis 3 kg/Ha/Jahr für S-SO₄, N-NH₄, N-NO₃, N_{tot} et Mg, und zwischen ± 60 eq/Ha/Jahr für H⁺ gemacht werden. Betreffend Na und Cl wurde die Schätzung mit einem Fehler von respektive ± 3 und 6 kg/Ha/Jahr außerhalb der atlantischen Küstenzone und zwischen ± 17 und 30 kg/Ha/Jahr innerhalb dieser Küstenzone gemacht. Die für die Periode 1993-1998 entwickelten Modelle wurden am Jahr 1999 getestet. Man beobachtet bei den kleineren Depositionswerten eine Überschätzung durch die Modelle von etwa 30% bei S-SO₄ und um 100% bei H⁺. Bei den anderen Ionen sind die modellierten Depositionen generell ähnlich den gemessenen, ausser für Cl, Na und Mg in Küstennähe. Innerhalb des Gültigkeitsrahmens der Modelle (außerhalb von Industriezonen und Ballungsräumen und < 1400 m Meereshöhe) beobachtet man eine Depositionsverteilung in Frankreich, welche oft niederschlagsreiche und -arme Zonen gegenüberstellt (S-SO₄, N_{tot}, N-NH₄, N-NO₃ und H⁺). Bei Na, Cl und Mg führt die Anreicherung durch Komponenten des Meereswassers zu einer sehr verschiedenen Verteilung. Die Küstenzonen und Korsika weisen sehr hohe, der Rest des Landes dagegen eher geringe Depositionen auf. Der Vergleich der hier entwickelten mit den EMEP-Karten (1995 und 1997) zeigt eine gute Übereinstimmung der jährlichen Mittel im grossen Rahmen, aber Unterschiede verschiedenen Grades je nach Ion erscheinen bei der Flächenverteilung der Depositionen. Diese Differenzen sind wahrscheinlich auf die unterschiedliche Feinheit der Modelle zurück zu führen (150*150 km oder 50 km 50 km für EMEP und 15*15km für unsere Karten) und die Einbeziehung von Emissionen und deren chemischen Transformation in der Atmosphäre durch EMEP.

Der geostatistische Ansatz hat, trotz der kleinen Anzahl von Stationen (27), zu befriedigenden Ergebnissen geführt. Es wurden für alle studierten Ionen flächenbezogene Strukturen gefunden und quantifiziert. Diese wurden mit Hilfe von Variogramm-Modellen und gekreuzten, Variogrammen angepasst. Dieser Schritt hat die multivariable Interpolation durch Co-krieging mit Hilfe einer Hilfsvariable ermöglicht: der Niederschlag der 2614 Météo-France Stationen. Der Beitrag dieser Hilfsvariable, die durch kreuzweise Validierung evualiert wurde, ist für die meisten Interpolationen signifikativ. Die daraus entstandenen Karten geben generell eine ähnliche Verteilung der Depositionen auf dem französischen Staatsgebiet wie die Karten, die mit den empirischen Modellen erstellt wurden. Der Vergleich zeigt für S-SO₄, N-NH₄ und N-NO₃, daß die empirischen Modelle, verglichen mit dem geostatistischen Ansatz, zu einer Überschätzung von 7% bis 11% führen und für Na, Cl, Mg und H⁺ von 17 bis 24%. Die höchsten Depositionswerte befinden sich generell in den gleichen Regionen mit Ausnahme von N-NH₄ und N-NO₃ im nord-östlichen Teil. Dieser zeigt eher höhere Werte beim geostatistischen Ansatz und mittlere Werte beim empirischen Ansatz. Weitere Entwicklungen des geostatistischen Ansatzes können folgendermaßen gemacht werden: (1) die Kartographie könnte durch die Verwendung der Methode der externen Drift verbessert werden, durch Variablen an neuen Punkten, die nicht zum CATAENAT-Messnetz gehören, von denen man jedoch weiss, daß sie mit den Depositionsvariablen korreliert sind; (2) die Überschreitung der „critical loads“ könnte Ansätze einer Antwort durch die geostatistische Methode bekommen, durch konditionale Simulation.

Ein erster Ansatz der etwaigen Überschreitung der „critical loads“ wurde gemacht durch (1) einen Vergleich unserer Karten mit der in Frankreich erarbeiteten „critical loads“ Karte für Acidität und (2) in dem die auf europäischer Ebene modellierten generellen „critical loads“ Werten mit den Depositionsmodellen verglichen wurden, auch wenn es sich nur um Bulkmessungen handelt. Es scheint als ob die Überschreitung der „critical loads“ in Frankreich mit spezifischen lokalen Verhältnissen zusammenhängt (Vogesen, westlicher Teil des Zentralmassifs und Landes), aber weitere Studien sind noch notwendig um gewisse Parameter, die in die Bewertung der Überschreitung aufgenommen werden müssen, zu präzisieren.

Diese ersten Ergebnisse dürfen nicht zu sehr optimistischen Schlußfolgerungen führen, da die Totaldepositionen im Wald meistens mindestens 20 bis 30% über den Bulkdepositionen liegen. Die Überschreitung der „critical loads“ für Acidität bleibt ein Risiko, welches man in Frankreich nicht unterschätzen sollte und dessen Langzeitüberwachung unbedingt notwendig ist.