

Calcul et cartographie des charges critiques azotées en France : application de la méthode empirique

Critical loads for nutrient nitrogen : calculations and mapping by empirical method for France

Jean-Paul PARTY*, Anne PROBST**, Anne-Laure THOMAS*, Étienne DAMBRINE***

NDLR : Article issu du Séminaire ADEME « Pollution atmosphérique et charges critiques : Bilan et perspectives des recherches menées en France », 15 mai 2001, Paris (MATE).

Résumé

La cartographie des charges critiques azotées pour la France a été entreprise par la méthode empirique. Pour cela, une carte numérique de la nature de la végétation est nécessaire. L'absence d'une cartographie adaptée à ce besoin nous a conduit à entreprendre une première synthèse de l'information contenue dans les cartes du CNRS au 1/200 000 disponibles sur support papier pour tout le territoire français.

Une première typologie de synthèse est présentée pour l'ensemble de la France. Elle comporte 76 unités pour lesquelles 99 % de l'information des légendes d'origine ont été conservées ; 41 de ces unités (deux tiers pour les forêts, un tiers pour les landes et prairies) qui représentent en nombre un peu plus de 40 % des unités recensées sur les cartes étudiées, présentent a priori une sensibilité aux charges critiques. Leur niveau de sensibilité est défini selon le manuel de cartographie de la CEE-ONU (1996) et les recommandations du RIVM.

La carte de la végétation définie par la typologie établie a été digitalisée, puis thématisée pour les charges critiques azotées, par quart du territoire français (nord-est, nord-ouest, sud-ouest et sud-est). L'assemblage de ces quatre cartographies a permis de produire les cartes attendues au 1/1 000 000 (végétation, charges critiques azotées pour les forêts et les prairies). Enfin, une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode SMB au pas de 50 km a été effectuée.

Abstract

Critical loads of nutrient nitrogen for France has been mapped according to the empirical method suggested by the UN/ECE. For this purpose, a phyto-ecological map is necessary. In this aim, a first numerical synthesis of the available 1/200 000 vegetation maps (published by the CNRS on paper support) for all France has been done (64 sheets).

The vegetation typology presents 76 units ; 41 of these vegetation units are considered sensitive to nitrogen addition (forests, about 2/3 ; heathlands and grasslands, about 1/3). This represents 40 % of all vegetation units from the 64 studied original vegetation maps. Their sensibility to nitrogen was computed according to the recommendations of the mapping manual of UN/ECE (1996) and the RIVM guidelines. Four maps of vegetation sensibility covering the North-East, North-West, South-West and South-East of France were drawn and the critical loads of nutrient nitrogen for France at the 1/1 000 000 scale were mapped. Finally, results of this method and of the SSMB method were compared and exceedances were calculated.

* SOL-CONSEIL, 2, rue de Roppenheim, 67000 Strasbourg.

** UPS-CNRS, LMTG-UMR 5563, 38, rue des 36 Ponts 31400 Toulouse.

*** INRA Nancy, Équipe Cycles biogéochimiques, 54280 Champenoux.

Introduction

En 1991, une première participation pour la prise en compte des données françaises pour la cartographie des charges critiques a été initiée [1]. Les travaux menés ensuite de 1992 à 1994 ont permis de présenter les premières données cartographiées par la France [2-4]. En 1996, les premières données françaises concernant la cartographie des charges critiques acides et azotées ont été intégrées à la base de données européenne coordonnée par le RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, National Institute of Public Health and the Environment) aux Pays-Bas. Les données rassemblées ont alors permis de répondre aux recommandations du RIVM, à savoir :

- la définition des types d'écosystèmes concernés à l'échelle du territoire français ;
- une cartographie d'objets géoréférencés dans un système d'information géographique, à un pas de 50 km ;
- un calcul des charges critiques basé sur la méthode du Steady State Mass Balance (SSMB) pour l'acidité.

En 1998, la base de données a été mise à jour, d'une part pour répondre à des demandes de cohérence du RIVM et d'autre part pour passer à une cartographie au pas de 50 km susceptible d'être présentée régionalement (soit à l'échelle du 1/5 000 000). Enfin, en 1999, une cartographie des charges critiques d'acidité au 1/1 000 000 a été établie [5, 6].

En revanche, en ce qui concerne les charges critiques azotées, à ce jour, seule une cartographie au pas de 50 km était disponible pour l'ensemble du territoire [7]. Ceci est lié à deux raisons :

- des données à notre connaissance disparates et localisées concernant le devenir de l'azote dans les écosystèmes forestiers français ; les données nécessaires au calcul de ces charges critiques azotées par la méthode du SSMB ne sont pas suffisantes pour une cartographie à l'échelle du 1/1 000 000 ;
- l'absence d'une carte numérique de la végétation suffisamment détaillée pour appliquer la méthode dite empirique de ces charges critiques azotées ; cette méthode reposant sur une sensibilité supposée différente des groupements phyto-écologiques aux apports d'azote atmosphérique.

Il n'est pas possible de combler la première de ces deux carences à court terme. Celle-ci nécessite en effet un programme d'acquisition de données spécifiques sur des sites représentatifs des écosystèmes forestiers français, à l'image de ce qui a pu être fait pour les charges critiques d'acidité. En revanche, l'acquisition d'une carte numérique de la végétation de la France suffisamment précise a été réalisée à partir de cartes existantes (sur support papier) pour tout le territoire français [8-11].

L'objectif de cet article est donc de présenter la synthèse cartographique réalisée sur la végétation

de la France et les résultats de l'application de la méthode empirique de calcul des charges critiques azotées à l'échelle du 1/1 000 000.

Méthodes de calcul et de cartographie des charges critiques azotées

Comme pour les charges critiques d'acidité, deux méthodes de calcul et de cartographie des charges critiques ont été proposées [12] : l'une, celle du Steady State Mass Balance (SSMB approach) nécessite la mesure de nombreux paramètres, l'autre dite « empirique » utilise des données cartographiques et bibliographiques existantes. En France, les données pour appliquer la méthode SSMB aux charges critiques azotées étant à ce jour insuffisantes pour une cartographie très précise (le résultat obtenu est au pas de 50 km), nous avons appliqué la « méthode empirique » pour une cartographie plus fine, mais aussi pour comparer le résultat des deux méthodes.

Méthode SSMB

Les éléments d'identification des types d'écosystèmes dans la maille EMEP à 50 km (code de l'écosystème, localisation des mailles EMEP50-i et EMEP50-j) sont nécessaires. Ensuite pour chaque carré ainsi défini, les données de base utilisées dans les calculs en France sont les suivantes :

- **Ni** (nitrogen immobilisation) : l'azote immobilisé dans les sols est une variable simple estimée pour les régions de plaines et les régions de montagne (respectivement 0,15 et 0,30 keq.ha⁻¹.an⁻¹) ;

Pour ce paramètre, nous avons réalisé une estimation basée sur les valeurs proposées par le RIVM au vu des conditions environnementales françaises. C'est une approximation qui postule que $Ni_{(crit)}$ correspond à l'accumulation d'azote total dans la matière organique des sols à long terme. Les valeurs mentionnées sont donc minimales.

Devant les incertitudes manifestes pour de nombreux écosystèmes, nous avons prudemment retenu une valeur basse. Ainsi, les gammes de valeurs proposées par le RIVM sont les suivantes : 0,14 à 0,21 keq.ha⁻¹.an⁻¹ (altitude < 500 m), 0,28 à 0,35 keq.ha⁻¹.an⁻¹ (altitude > 1 500 m).

- **Nu** (nitrogen uptake) : l'azote prélevé par la végétation est estimé en fonction des essences forestières (0,065 keq.ha⁻¹.an⁻¹ pour les conifères et 0,038 keq.ha⁻¹.an⁻¹ pour les feuillus) ;

Ces chiffres ont été obtenus par une méthode de calcul [13] basée sur les teneurs en N, Ca, Mg et K des arbres, selon la densité de leur bois. C'est la méthode la plus couramment utilisée en Europe et celle qui a été aussi utilisée en France.

Les résultats sont peu susceptibles de variations puisqu'il s'agit de mesures par pesées après une découpe standardisée de quelques arbres représentatifs d'une placette donnée au sein d'un peuplement forestier.

• **Nde** : les valeurs de dénitrification sont estimées en fonction de paramètres pédologiques ($0 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les sols drainants et $0,05 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ pour les sols hydromorphes) ;

Pour le calcul de ce paramètre, nous avons utilisé la méthode dite « constante » [14]. Celle-ci suppose que l'azote dénitrifié résulte de la différence entre les trois autres facteurs (Ndep, Nu et Ni), mais qu'il est soumis à un facteur de dénitrification lié à l'hydromorphie des sols. Ainsi, l'équation simple suivante est proposée :

$$\text{Nde} = fde \cdot (\text{Ndep} - \text{Nu} - \text{Ni}),$$

Ndep correspondant aux dépôts d'azote, avec $\text{Ndep} > \text{Nu} + \text{Ni}$, sinon $\text{Nde} = 0$

fde correspond à un taux de dénitrification constant selon l'hydromorphie du sol compris entre 0,1 et 0,8 (0,1, sols de limons ou sables drainants, 0,5 à 0,8, argiles et sables hydromorphes, tourbes). Si l'on connaît les trois autres paramètres, ceci conduit au calcul des valeurs suivantes :

- pour les sols drainants, de $0,01$ à $0,05 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$;
- pour les sols hydromorphes, $0,05$ à $0,40 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$;

Une fois encore, par prudence, nous avons retenu les valeurs estimées les plus basses.

• **Nle** (nitrogen leaching) : l'azote lessivé est estimé pour les feuillus de plaine ($0 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$), les conifères de plaine ($0,05 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$) et indistinctement pour les feuillus et les résineux dans les zones de montagne ($0,1 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$). Les valeurs proposées par le RIVM sont dans tous les cas supérieures : pour les conifères, $0,14$ à $0,28 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, pour les feuillus, $0,28$ à $0,35 \text{ keq.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$.

On suppose pour ce terme que les changements de concentration en azote dans la solution du sol induiront des changements dans la végétation. Il est calculé comme suit :

$\text{Nle}_{(\text{crit})} = Q \cdot [\text{N}]_{\text{crit}}$, Q correspondant au drainage du bassin versant

Des valeurs indicatives sont données par le RIVM pour $[\text{N}]_{\text{crit}}$ par nature de végétation.

En France, les forêts sont les écosystèmes réputés parmi les moins pollués, notamment vis-à-vis de l'azote. Les bilans réalisés sur diverses stations forestières du territoire (épicéas ou douglas en montagne ou moyenne montagne, hêtre en plaine) ont montré que le lessivage de l'azote était nul (voire négatif, l'écosystème retenant plus d'azote qu'il n'en libère) pour les hêtraies lorraines [15], alors qu'il est légèrement positif pour les résineux, en particulier les vieux peuplements d'épicéas des Vosges [16].

À partir de ces valeurs concernant l'azote sont calculées :

- les charges critiques minimum pour l'azote acidifiant : $\text{CLmin}(\text{N}) = \text{Ni} + \text{Nu}$;
- les charges critiques maximum pour l'azote acidifiant : $\text{CLmax}(\text{N}) = \text{CLmax}(\text{S}) + \text{Ni} + \text{Nu}$;

– les charges critiques pour l'azote eutrophisant : $\text{CLnut}(\text{N}) = \text{Ni} + \text{Nu} + \text{Nde} + \text{Nle}$.

Le résultat de ces calculs est enfin appliqué à chaque maille EMEP au pas de 50 km afin d'établir la carte de chacun de ces paramètres à l'échelle de la France.

Méthode empirique

Cette méthode, à la différence de la précédente, n'est pas une méthode mécaniste. C'est une méthode qui repose sur une « estimation des quantités de dépôts azotés induisant des modifications détectables dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes en l'état actuel de nos connaissances » [12].

Les données existantes ont été compilées et synthétisées au niveau européen selon des tables attribuant des valeurs de charges critiques aux différents écosystèmes. Ces valeurs sont issues de données expérimentales contrôlées ou obtenues dans le milieu. Il s'agit principalement d'analyses chimiques, de comparaisons de l'évolution de la végétation et de la faune dans le temps et dans l'espace, de modélisation d'écosystèmes ou encore des connaissances actuelles en biologie.

Le tableau 1, p. 534, résume l'ensemble de ces données. À chaque groupement végétal est associée une charge critique qui correspond à une classe de valeurs pour laquelle des effets ont pu être observés. Cette classe prend en compte une certaine incertitude vis-à-vis de l'écosystème concerné. Chaque classe de valeur fait l'objet d'un degré de confiance différent selon la fiabilité des sources ayant servi à l'établir :

** : publications de nombreuses études aux résultats comparables ;

* : publications de seulement quelques études ;

(*) : jugements d'experts.

Le type de changement induit est indiqué.

Enfin, pour déterminer les valeurs inférieures ou supérieures de charges critiques, le manuel de cartographie de la CEE-ONU [17] recommande d'appliquer une pondération selon la température, l'humidité du sol, la longueur de la période froide et la disponibilité en cations basiques (Tableau 2, p. 535). Interviennent ici des cartes au 1/1 000 000 déjà produites ou utilisées pour les charges critiques d'acidité :

- la carte du continuum sols-altérites-roches de France ;
- la carte des taux d'altération des sols français établie ;
- la carte des pluies efficaces.

Pour appliquer cette méthode empirique de cartographie des charges critiques azotées au territoire français, plusieurs étapes ont été nécessaires :

1. une carte synthétique de la végétation a d'abord été produite à l'échelle du 1/1 000 000 à l'aide des 64 cartes de végétation existantes, pour la France, à l'échelle du 1/200 000 ;

Tableau 1.

Charges critiques azotées empiriques pour les écosystèmes terrestres et semi-aquatiques (Adapté de UN/ECE, 1996 [17]).
Empirical critical loads for nitrogen to (semi-)natural terrestrial and wetland ecosystems (Adapted from UN/ECE, 1996 [17]).

Type d'écosystème récepteur	Classe de charge critique kg/ha.an	Indicateur du dépassement de charge critique
Arbres		
Conifères (en milieu acide)	10-15**	Déséquilibre nutritionnel (faible taux de nitrification)
Conifères (en milieu acide)	20-30*	Déséquilibre nutritionnel (taux de nitrification modérément élevé)
Feuillus	15-20 (*)	Déséquilibre nutritionnel ; augmentation du rapport repousses aériennes/racines
Écosystèmes forestiers		
Forêts de conifères acides	7-20**	Changements dans la végétation terrestre et les mycorrhizes ; augmentation du lessivage
Forêts de feuillus acides	10-20*	Changements dans la végétation terrestre et les mycorrhizes
Forêts calcaires	15-20 (*)	Changements dans la végétation terrestre
Forêts acides (non exploitées)	7-15 (*)	Changements dans la végétation terrestre et le lessivage
Forêts en climat humide (océanique)	5-10 (*)	Déclin des lichens et des algues
Landes		
Landes sèches de plaine	15-20**	Lande passant à la prairie ; changement fonctionnel (production de litière, floraison, accumulation d'azote)
Landes humides de plaine	17-22*	Lande passant à la prairie
Landes riches en espèces et prairies acides	10-15*	Déclin des espèces sensibles
Landes à callune de montagne	10-20 (*)	Déclin de la dominance de la lande, des mousses et des lichens ; accumulation d'azote
Landes alpines et arctiques	5-15 (*)	Déclin des lichens, des mousses et des arbrisseaux nains
Prairies riches en espèces		
Prairies calcaires	15-35* (rmq)	Augmentation de la minéralisation, de l'accumulation d'azote et du lessivage ; augmentation des hautes herbes, changement dans la diversité des espèces
Prairies neutro-acidoclines	20-30*	Augmentation des hautes herbes, changement dans la diversité des espèces
Prairies subalpines	10-15 (*)	Augmentation des grandes graminées, changement dans la diversité des espèces
Zones humides		
Marais mésotrophes	20-35*	Augmentation des grandes graminées, déclin de la diversité des espèces
Tourbières ombrotrophes	5-10*	Diminution des mousses typiques, augmentation des grandes graminées, accumulation d'azote
Pièces d'eau douce peu profondes	5-10**	Déclin des espèces de plantes aquatiques du groupe des Isoètes

(rmq) : limite inférieure de classe pour les écosystèmes à azote limitant, limite supérieure dans les cas à phosphore limitant.

Chaque classe de valeur fait l'objet d'un degré de confiance différent selon la fiabilité des sources ayant servi à l'établir :

** : publications de nombreuses études aux résultats comparables ;

* : publications de seulement quelques études ;

(*) : jugements d'experts.

Tableau 2.

Pondérations hautes, moyennes et basses à utiliser pour le classement des charges critiques azotées des écosystèmes terrestres (zones humides non comprises), en cas de données nationales insuffisantes (UN/ECE, 1996 [17]).

Suggestions on how to use lower, middle or upper part of the range of critical load values for terrestrial ecosystems (excluding wetlands), if national data are insufficient (UN/ECE, 1996 [17]).

Valeur de charge critique	Température	Humidité du sol	Période froide	Disponibilité en cations basiques
inférieure	froide	sec	longue	faible
moyenne	intermédiaire	normal	courte	moyenne
supérieure	chaude	humide	aucune	forte

2. les recommandations du modèle empirique ont ensuite été appliquées sur une liste d'écosystèmes français avec des valeurs (et des classes) adaptées de charges critiques azotées ;

3. ces valeurs ont été appliquées à la carte de végétation synthétique des écosystèmes forestiers et prairiaux du territoire français, ce qui a permis d'en dériver une carte des charges critiques azotées potentielles pour la France ;

4. enfin, une comparaison est tentée avec les résultats de la méthode SSMB ; en particulier, une carte des dépôts atmosphériques d'azote au pas de 50 km [18, 19] utilisée pour établir les dépassements de charges critiques azotées.

Résultats et discussion

– Typologie et carte synthétique de la végétation réalisée pour l'ensemble de la France

Nous avons défini quatre niveaux de regroupement de la végétation pour le territoire français, selon un système emboîté. Ces quatre niveaux de précision présentent successivement :

- 24 paysages végétaux ;
- 47 groupements forestiers ;
- 76 séries de végétation ;
- 132 faciès de végétation et de physionomie.

Les 2 300 unités définies dans les 64 cartes au 1/200 000 utilisées ont ainsi été regroupées au sein de 24 paysages végétaux et correspondent à 18 ensembles définis pour la France (Figure 1, p. 536) :

- 1-2 : formations littorales et herbacées humides.
- 3 : formations arborescentes du bord des eaux (aulne).
- 4 : chênaies à chêne pédonculé.
- 5 : chênaies à chênes pédonculé et tauzin.
- 6 : chênaies à chêne sessile.
- 7 : chênaies mixtes.
- 8 : chênaies mixtes à hêtres.
- 9-10-11 : chênaies pubescentes.
- 12 : chênaies vertes.

13 : suberaies.

14 : pineraies à pins méditerranéens.

15 : pineraies à pin maritime.

16-17-18 : hêtraies, hêtraies sapinières et sapinières.

19 : pessières.

20 : pineraies à pin sylvestre.

21 : pineraies à pins de montagne.

22 : mélézins.

23-24 : alpages du subalpin et de l'alpin.

Elles se répartissent en nombre comme suit :

- 1 et 2 : formations littorales et herbacées humides pour 10 % ;
- 3 : formations arborescentes du bord des eaux (aulne) pour 10 % ;
- 4 à 7 : chênaies (grands chênes) pour 33 % ;
- 8 : hêtraies chênaies et hêtraies pures pour 10 % ;
- 9 à 11 : chênaies pubescentes (+ pin sylvestre + reboisements) pour 10 % ;
- 12 à 14 : chênes et pins méditerranéens pour 10 % ;
- 15 : pin maritime pour 4 % ;
- 16 à 19 : hêtraies, hêtraies sapinières et pessières pour 6 % ;
- 20 : pin sylvestre pour 3 % ;
- 21 et 22 : pins de montagne et mélèze pour 1 % ;
- 23 et 24 : alpages subalpin et alpin pour 3 %.

Les formations à base de chênes et de hêtres correspondent pratiquement à 53 % des unités définies, les résineux à 24 %, le littoral et le bord des eaux douces à 20 %, l'alpin et le subalpin à 3 %.

Ensuite, 47 unités de synthèse (que nous avons nommées « groupements forestiers ») correspondent à une représentation de 75 % des 2 300 unités compilées. Celles ci correspondent ensuite à 76 « séries de végétation », soit 99 % des unités compilées. Enfin, nous avons conservé le détail de la physionomie et des faciès végétaux, soit au total 132 unités. Ces dernières n'ont cependant pas été cartographiées. Ce ne serait sans doute possible qu'à partir de l'échelle du 1/250 000.

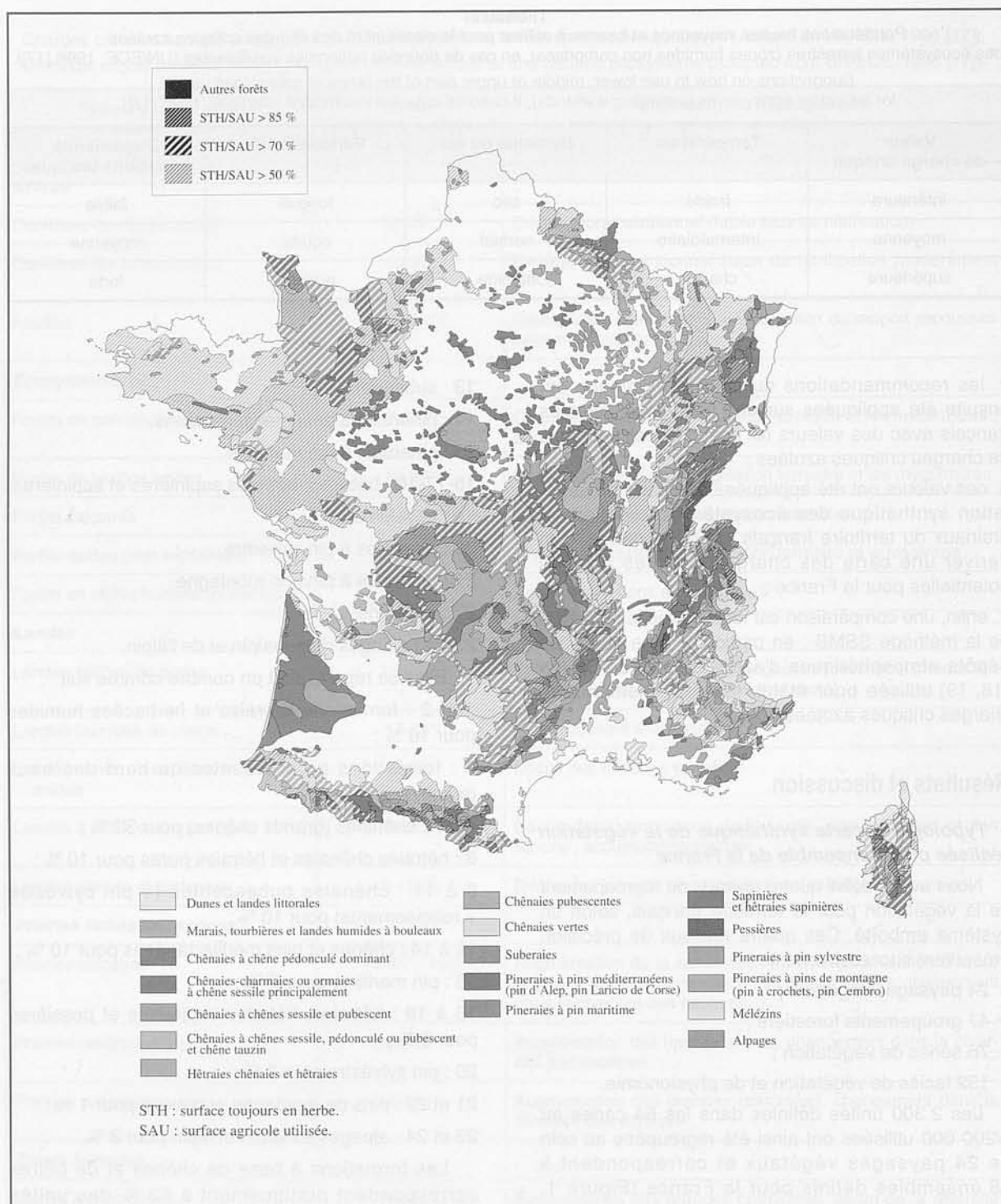


Figure 1.
L'espace forestier et prairial en France.
Main forest and grassland ecosystems in France.

– **Les cartes des charges critiques azotées par type de végétation**

La typologie de la végétation forestière et prairiale étant établie pour l'ensemble de la France, nous avons appliqué aux séries de végétation concernées les valeurs de charge critique azotée telle que définies

précédemment au tableau 2, p. 535. Ces données ont été adaptées de façon spécifique aux écosystèmes forestiers français (Tableau 3, ci-contre).

Les unités concernées par une sensibilité plus ou moins affirmée aux charges critiques azotées en France correspondent à plus de 40 % des unités

Tableau 3.
Charges critiques azotées empiriques pour les écosystèmes terrestres et semi-aquatiques appliquées en France
(kg N ha⁻¹.an⁻¹).

Empirical critical loads for nitrogen to (semi-)natural terrestrial and wetland ecosystems applied in France
(kg N ha⁻¹.an⁻¹).

Types de végétation	Écosystème	Charge critique kgN ha ⁻¹ .an ⁻¹	Valeur retenue kgN ha ⁻¹ .an ⁻¹	Classe
1. Dunes et landes littorales <i>Koelerion essentiellement</i>	1.1. Landes sèches + zones humides	15-20 20-35	25	5
2. Marais, tourbières et landes humides à bouleaux <i>Phragmition, Juncion, Ulici-Ericion ; Vaccinio- Pinion, Sphagno-Betulion</i>	2.1. Landes humides de plaine et tourbières	17-22 5-10	10	2
3. Chênaies à chêne pédonculé dominant – <i>Quercion</i> <i>robori-petraeae, Carpinion betuli</i> et <i>Alno-padion</i>	3.1. Forêts	5-10	10	2
	3.2. Landes et prairies acides à acidoclines	10-15 20-30	17	4
4. Chênaies-charmaies ou ormaies à chênes sessiles <i>Quercion robori-petraeae, Carpinion betuli</i>	4.1. Forêts	10-20	12	2
	4.2. Landes et prairies acides à acidoclines	10-15 20-30	17	4
5. Chênaies à chênes sessile et pubescent <i>Quercion robori-petraeae/pubescenti- petraeae, Carpinion betuli</i>	5.1. Forêts	15-20 20-35	17	4
	5.2. Landes et prairies acides à acidoclines (parfois calciques)	10-15 20-30	20	4
6. Chênaies à chênes sessile, pédonculé ou pubescent et chêne tauzin <i>Quercion robori-pyrenaicae</i>	6.1. Forêts (Périgord et Bordelais)	15-20	17	4
	6.2. Forêts (SO et Nantais)	5-10	10	2
	6.3. Landes et prairies acidoclines à calcaires	10-15 15-35	17	4
7. Hêtraies chênaies et hêtraies <i>Luzulo-Fagenion et Lonicero-Carpinenion</i> <i>Cephalanthero-Fagenion, Daphno- Carpinenion et Tilio-Acerion</i>	7.1. Forêts (Atlantique + Massif central)	10-20	15	3
	7.2. Forêts (NE)	15-20	17	4
	7.3. Landes et prairies acides à acidoclines	10-15 20-30	17	4
8. Chênaies pubescentes <i>Quercion pubescenti-petraeae</i> <i>Quercion pubescentis et ilicis</i>	8.1. Forêts (sauf Corse)	15-20	20	4
	8.2. Landes et prairies calcaires	15-35	25	5
	8.3. Forêts (Corse)	15-20	15	3
	8.4. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
9. Chênaies vertes – <i>Quercion ilicis</i>	9.1. Forêts (SE)	15-20	20	4
	9.2. Landes et prairies calcaires	15-35	25	5
	9.3. Forêts (Corse)	15-20	15	3
	9.4. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2

Tableau 3 (suite).
Charges critiques azotées empiriques pour les écosystèmes terrestres et semi-aquatiques appliquées en France
(kg N ha⁻¹.an⁻¹).

Empirical critical loads for nitrogen to (semi-) natural terrestrial and wetland ecosystems applied in France
(kg N ha⁻¹.an⁻¹).

Types de végétation	Écosystème	Charge critique kgN ha ⁻¹ .an ⁻¹	Valeur retenue kgN ha ⁻¹ .an ⁻¹	Classe
10. Suberaies – <i>Quercion suberis</i>	10.1. Forêts (sauf Corse)	7-15	10	2
	10.2. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
	10.3. Forêts (Corse)	15-20	15	3
	10.4. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
11. Pinaies à pins méditerranéens – pin d'Alep – faciès du <i>Quercion ilicis</i> – pin Laricio de Corse <i>Gallio-Pinetum larici</i>	11.1. Forêts	7-20	15	3
	11.2. Landes riches et prairies acides	10-15	12	2
12. Pinaies à pin maritime <i>Ericenion, Pinenion maritimi</i>	12.1. Forêts	7-20	7	1
	12.2. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
13. Sapinières et hêtraies sapinières <i>Fagion sylvaticae (Abieti-Fagenalia)</i>	13.1. Forêts	7-20	12	2
	13.2. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
14. Pessières <i>Vaccinio-Piceion</i>	14.1. Forêts	7-20	10	2
	14.2. Landes riches et prairies acides	10-15	10	2
15. Pinaies à pin sylvestre – <i>Erico-Pinion, Ononido-, Seslerio et Cephalanthero-Pinion</i>	15.1. Forêts	7-20	7	1
	15.2. Landes à callune	10-20	10	2
16. Pinaies à pins de montagne (pin à crochets, pin Cembro) <i>Erico-Pinion, Juniperion nanae, Rhododendro-Vaccinon</i>	16.1. Forêts	7-20	7	1
	16.2. Prairies subalpines, landes alpines	5-15 10-15	7	2
17. Mélézins <i>Rhododendro-Vaccinon</i>	17.1. Forêts	7-15	10	2
	17.2. Prairies subalpines, landes alpines	5-15 10-15	10	2
18. Alpages	18.1. Prairies subalpines, landes alpines	5-10 10-15	7	1

décrites (soit un peu plus de 1 000) dans les 64 feuilles au 1/200 000 étudiées dont les deux tiers pour des formations forestières et un tiers pour les landes et les prairies. Enfin, une partie des unités de zones humides mentionnées est susceptible d'être sensible aux charges critiques azotées.

– **Valeurs observées et comparaison des cartes « empiriques » avec les cartes CLnutN issues du SSMB et les cartes de dépôts azotés**

Par la méthode SSMB, selon une cartographie au pas de 50 km, nous montrons pour CLnutN que les sensibilités les plus importantes se situent dans le

nord de la Bretagne et en Normandie, mais que compte tenu des valeurs basses calculées, de nombreux écosystèmes naturels terrestres de France peuvent présenter une sensibilité réelle aux charges critiques azotées.

De même, les dépassements de charges critiques sont supposés affecter la plupart du territoire français, en particulier la moitié nord, Massif central inclus. Le pourtour méditerranéen et la région sud-ouest, Pyrénées comprises, semblent cependant moins touchés par ces dépassements (Figures 2 à 5, ci-contre).

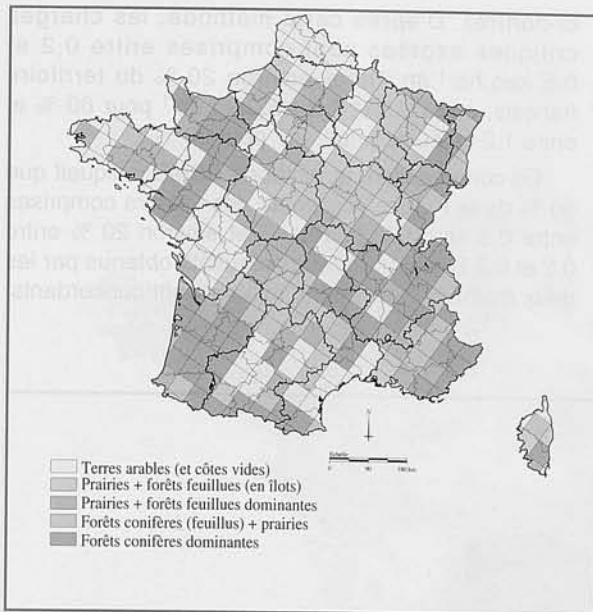


Figure 2.
Occupation des sols en France selon l'importance
des formations forestières ou prairiales
(d'après la base LU-EMEP/RIVM),
au pas de 50 km (grille EMEP).

Land use in France based
on forest and grassland ecosystems percentage
on EMEP grid (LU-EMEP/RIVM).

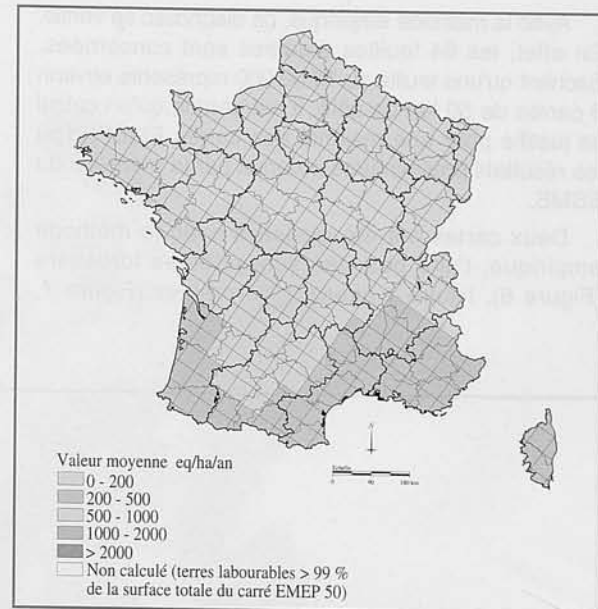


Figure 3.
Carte du dépôt atmosphérique d'azote eutrophisant
en 1996 (EMEP/modèle MADE50, 1997),
au pas de 50 km (grille EMEP).

Atmospheric deposition for nutrient nitrogen
in 1996 on EMEP grid
(EMEP/MADE50 model, 1997).

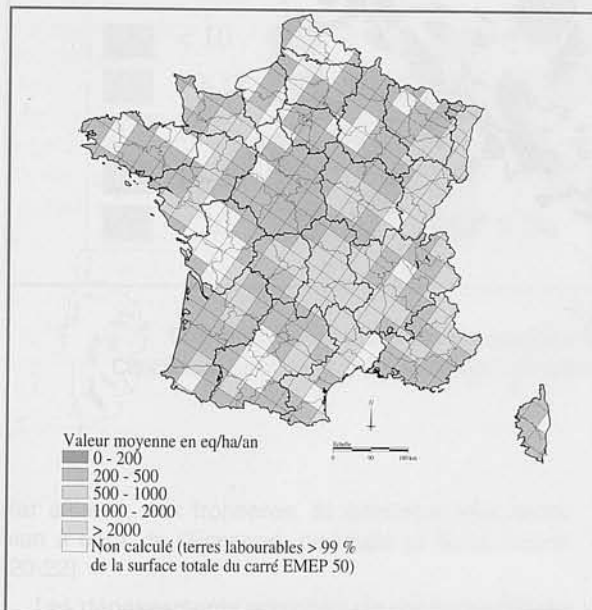


Figure 4.
Charge critique maximum pour l'azote eutrophisant
(CLnutN) en France au pas de 50 km
(grille EMEP, méthode SSMB).

Maximum critical load for nutrient nitrogen
(CLnutN) in France on EMEP grid
(SSMB method).

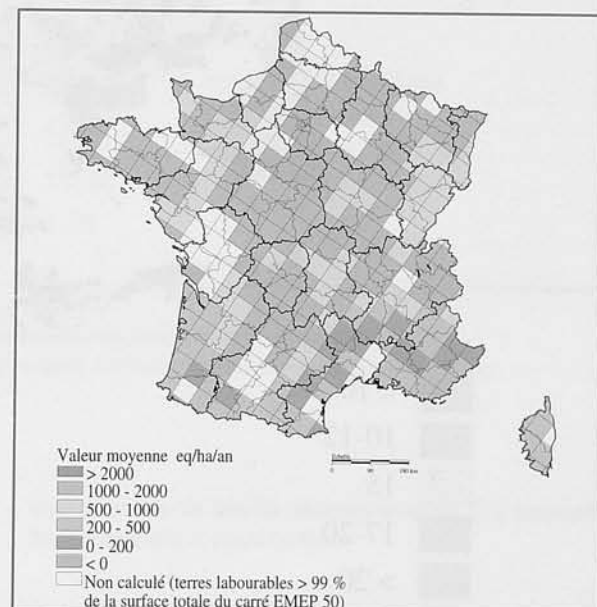


Figure 5.
Dépassement de la charge critique maximum
pour l'azote eutrophisant (CLnutN) en France
(grille EMEP, méthode SSMB).

Critical load exceedance for nutrient nitrogen
(CLnutN) in France on EMEP grid
(SSMB method).

Avec la méthode empirique, ce diagnostic se vérifie. En effet, les 64 feuilles étudiées sont concernées. Sachant qu'une feuille au 1/200 000 représente environ 6 carrés de 50 km de côté, il est certain qu'un calcul se justifie pour une majorité des carrés EMEP, d'où les résultats préliminaires obtenus par la méthode du SSMB.

Deux cartes ont été réalisées avec la méthode empirique, l'une pour les écosystèmes forestiers (Figure 6), l'autre y ajoutant les prairies (Figure 7,

ci-contre). D'après cette méthode, les charges critiques azotées sont comprises entre 0,2 et 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹ pour environ 20 % du territoire français, entre 0,5 et 1,2 keq.ha⁻¹.an⁻¹ pour 60 % et entre 1,2 et 2,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹ pour 20 %.

En comparaison, la méthode SSMB indiquait que 80 % de la France présentait des valeurs comprises entre 0,5 et 1,0 keq.ha⁻¹.an⁻¹ et environ 20 % entre 0,2 et 0,5 keq.ha⁻¹.an⁻¹. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont donc relativement concordants.

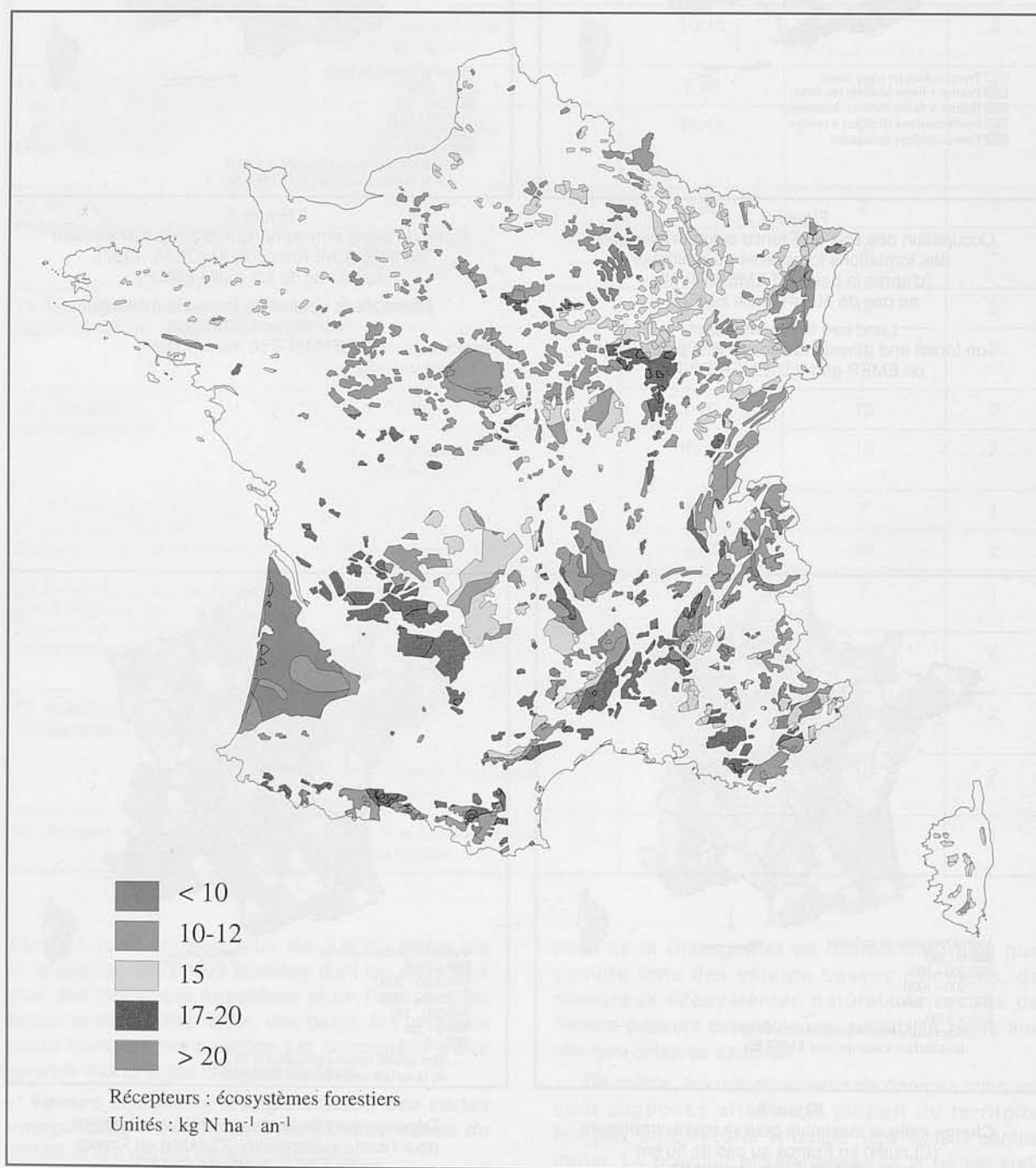


Figure 6.
Charges critiques azotées empiriques pour les écosystèmes forestiers en France.
Critical load for nutrient nitrogen (ClnutN) in France (forest ecosystems, empirical method).

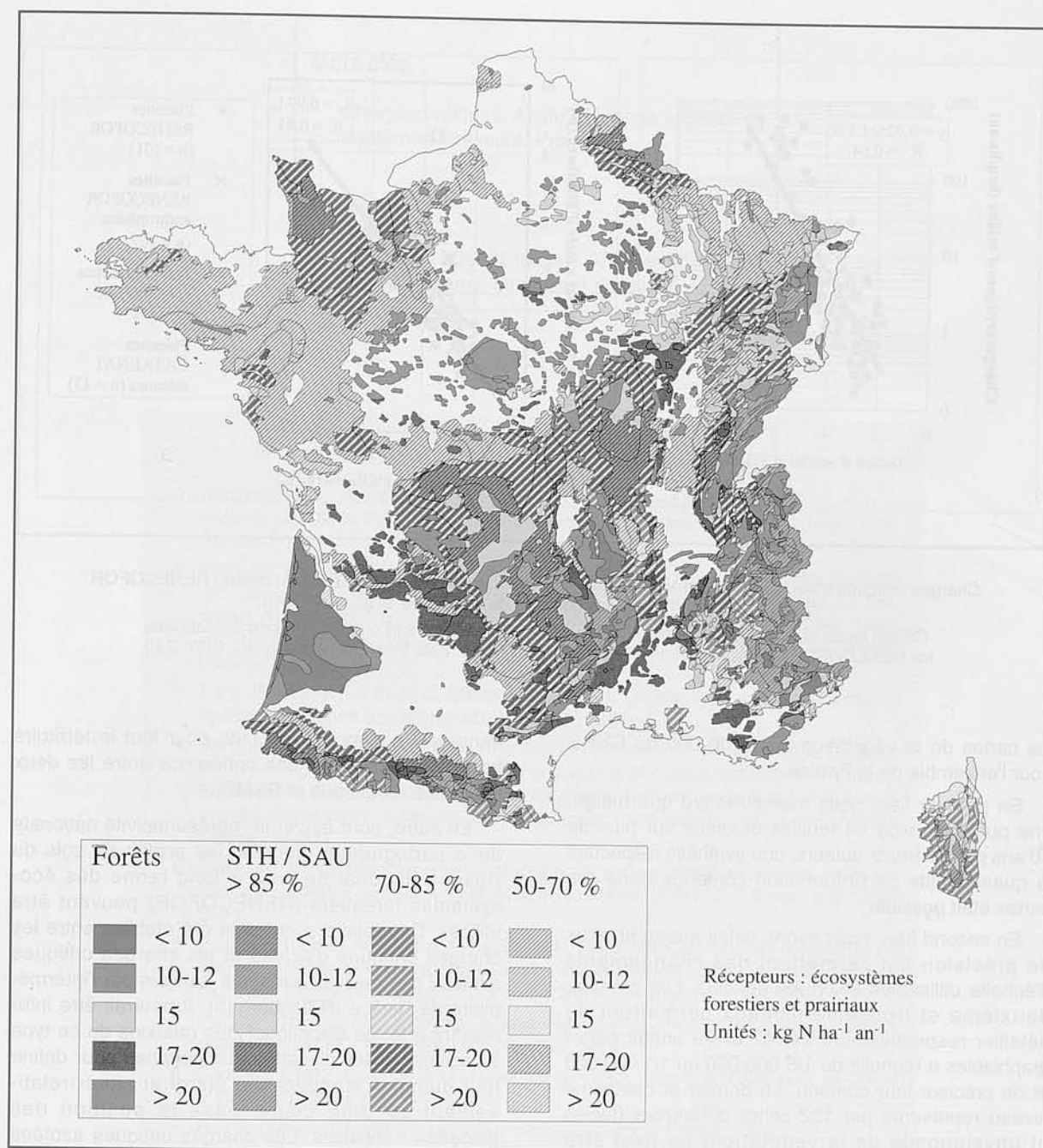


Figure 7.

Charges critiques azotées empiriques pour les écosystèmes forestiers et prairiaux en France.

Critical load for nutrient nitrogen (ClnutN) in France (grassland and forest ecosystems, empirical method).

Par ailleurs, aux frontières, ils correspondent assez bien à ceux de l'Espagne, de l'Italie et de la Suisse [20-22].

Les dépassements potentiels de charges critiques azotées concernent quant à eux la majorité du territoire français, et tout particulièrement le nord-est de la France. Ceci est un fait avéré notamment pour les Ardennes, et à moindre titre pour les Vosges.

Ces résultats constituent un premier état des lieux pour la France. Un second état basé sur des cartes

plus précises de dépôts atmosphériques [23] pourrait être disponible à court terme.

Conclusion et perspectives

Le présent travail est une première étape. Une carte de végétation de type phyto-écologique a été utilisée pour le calcul des charges critiques azotées par la méthode empirique. Ainsi, nous avons présenté une synthèse des séries de végétation décrites dans

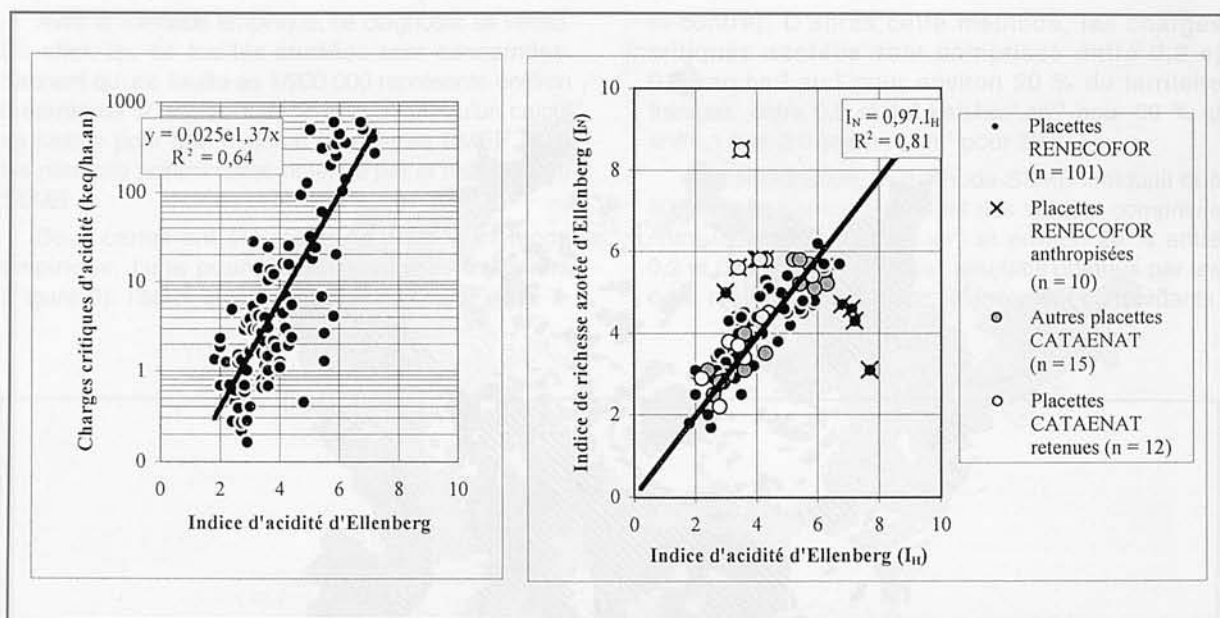


Figure 8.

Charges critiques d'acidité, indices d'acidité et de richesse azotée pour les placettes du réseau RENECOFOR (Party, 1999 [5], d'après des données de Dobremez et al., 1997 [24]).

Critical loads of acidity, and vegetation-derived indice of acidity and nutrient nitrogen availabilities for RENECOFORr Network in France (Party, 1999 [5], near data from Dobremez et al., 1997 [24]).

les cartes de la végétation au 1/200 000 du CNRS pour l'ensemble de la France.

En premier lieu, nous avons montré que malgré une publication de 64 feuilles étudiées sur plus de 40 ans par différents auteurs, une synthèse respectant la quasi-totalité de l'information contenue dans ces cartes était possible.

En second lieu, nous avons défini quatre niveaux de précision qui permettent des changements d'échelle utilisables selon les besoins. Les premier, deuxième et troisième niveaux permettent de détailler respectivement 24, 47 et 76 unités cartographiables à l'échelle du 1/5 000 000 au 1/1 000 000 et de préciser leur contenu. Le dernier et quatrième niveau représenté par 132 unités différentes (faciès et physionomie de la végétation) ne peut être vraiment utilisé qu'à une échelle proche du 1/250 000.

Une interprétation des 76 séries de végétation pour les charges critiques azotées a été réalisée ; 41 de ces unités sont a priori sensibles selon les recommandations de la CEE-ONU et du RIVM. Au total, ces unités représentent en nombre environ 40 % des unités originelles répertoriées, toutes les cartes utilisées étant concernées.

Les sensibilités aux charges critiques azotées les plus importantes et leurs dépassements sont situés avec la méthode SSMB essentiellement dans le nord de la France, mais de nombreux écosystèmes naturels terrestres de France peuvent présenter une sensibilité aux charges critiques azotées. Ceci est vérifié par la méthode empirique. Ainsi, il est certain qu'un calcul se justifie pour une grande majorité des carrés EMEP définis au pas de 50 km pour le territoire

français. La comparaison faite pour tout le territoire français montre ainsi une cohérence entre les deux méthodes (empirique et SSMB).

En outre, pour étayer la représentativité nationale de la cartographie réalisée, les profils de sols du Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR) peuvent être utilisés. Des relations ont déjà été établies entre les charges critiques d'acidité et les charges critiques azotées des massifs forestiers français par l'intermédiaire de l'indice d'Ellenberg [5]. Il pourrait être intéressant à terme d'appliquer des relations de ce type à l'ensemble des placettes européennes pour définir leur domaine d'application élargi et situer relativement sur une même base la position des placettes françaises. Les charges critiques azotées pourraient être modélisées à partir des relevés floristiques en relation avec les charges critiques acides en utilisant par exemple les indices d'Ellenberg (Figure 8).

Enfin, ces méthodes pourraient être développées aussi au plan régional sur la base des études de typologie des stations forestières ou de données régionales spécifiques.

Remerciements

Les travaux sur les charges critiques ont pour l'essentiel été financés par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et le ministère de l'Environnement.

Mots clés

Charges critiques. Azote. Carte de végétation.
Écosystèmes forestiers. Prairies.

Keywords

Critical loads. Nitrogen. Vegetation map.
Forest ecosystems. Grassland ecosystems.

Références

1. Dambrine E. In : Hettelingh JP, Downing RJ, de Smet PAM (eds). – CEC Tech. Rep. 1. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven 1991 : 1-86. Annexe France.
2. Party JP, Probst A, Dambrine E, Thomas AL. In : Posch M, de Smet PAM, Hettelingh JP, Downing RJ, 1995. Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status report 1995. Coordinating center for effects. National Institute of Public Health and the Environment. Bilthoven, the Netherlands. RIVM report 1995 : 1-198. Annexe France : 8 p.
3. Party JP, Probst A, Février C, Dambrine E, King D, Thomas AL. Les charges critiques en France. Rapport scientifique ADEME 1997 : 59 p.
4. Party JP, Probst A, Dambrine E, Thomas AL. In : Posch M, de Smet PAM, Hettelingh JP, Downing RJ, 1999. Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status report 1999. Coordinating center for effects. National Institute of Public Health and the Environment. Bilthoven, the Netherlands. RIVM report 1999 : 1-165. Annexe France : 86-90.
5. Party JP. Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances. Thèse, ULP-CNRS Strasbourg 1999 : 249 p.
6. Party JP, Thomas AL, Probst A, Dambrine E, Stussi JM. Cartographie des calculs de charges critiques acides et azotées pour la France. Premier aperçu régionalisé au pas de 50 km. Charges critiques d'acidité au 1/1 000 000. Rapport ADEME 1999 : 73 p.
7. Party JP, Thomas AL. Cartographie de la végétation et des charges critiques azotées pour la France. SOL-CONSEIL, ADEME 2000 : 30 p.
8. Gaussen, CNRS. Carte de la végétation de la France, 1 carte à 1/1000 000, 64 cartes à 1/200 000. CNRS Ed., 1949 à 1990.
9. Rey G, Dupias G. Carte des régions phytoécologiques de France, 1985.
10. Houzard. Carte de la végétation potentielle de la France. In : INRA-SCEES, 1989. Atlas de la France Rurale. Ed. De Monza, 1986.
11. Ozenda P, Lucas MJ. Esquisse d'une carte de la végétation potentielle de la France à 1/1 500 000, Documents de cartographie écologique 1987 ; XXX : 49-80.
12. Grennfelt P, Thörlöf E. Critical loads for nitrogen, Nord 1992, 41, Copenhagen, Nordic Council of Ministers 1992.
13. De Vries W, Hol A, Tsalma S, Voogdi JC. Amounts and turnover rates of elements in forest ecosystems : a literature study. Winand Staring center report, Wageningen, The Netherlands (Commentaire) 1990.
14. De Vries W. In : Hettelingh JP, De Wries W. Mapping vade-mecum. RIVM rep. 259101002, Bilthoven, The Netherlands 1992.
15. Dupouey JL, Thimonier A, Lefèvre Y, Le Tacon F, Bonneau M, Dambrine E, Poszwa A, Landmann G. Acidification et enrichissement en azote des sols forestiers du nord-est de la France au cours des dernières décennies. Revue Forestière Française 1998 ; 5 : 391-402.
16. Bonneau M, Dambrine E, Dupouey JL, Lefèvre Y, Thimonier A. Appauvrissement rapide de sols forestiers dans le nord-est de la France. Cahiers du DSF 1997 ; 1-1997 : 63-6.

17. UN/ECE. Manual on methodologies for mapping critical loads/levels and geographical areas where they are exceeded ; 144 p : 1996.
18. Jakobsen HA, Johnson JE, Berge E. Source receptor calculations for acidifying compounds by use of the multi-layer model with 50 km resolution EMEP MSC-W Report 1/97 : 87-93.
19. Tsyro S, Mc Innes H. Long-term Source-Receptor calculations for acidifying and eutrophying compounds 1997. EMEP MSC-W Report 1/97, pp. 67-72 + Appendix A1-12.
20. Posch M, Hettelingh JP, de Smet PAM, Downing RJ (eds). Calculation and mapping of critical thresholds in Europe, CCE Stat. Rep. 1997, UN/ECE. Convention on long-range transboundary air pollution, National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven 1997 : 163 p.
21. Posch M, Hettelingh JP, de Smet PAM, Downing RJ (eds). Calculation and mapping of critical thresholds in Europe, CCE Stat. Rep. 1999, UN-ECE. Convention on long-range transboundary air pollution, National Institute of Public Health and Environment Protection, Bilthoven 1999 : 165 p.
22. Rihm B, Achermann B. Critical loads of nitrogen and their exceedances. FOEFL, Environmental series 1996 ; (275) : 74 p.
23. Croisé L, Ulrich E, Duplat P. Estimation des dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier sur le territoire français en vue d'établir des cartes d'excès de charges critiques d'acidité. ONF, ADEME 2001 ; 71 p.
24. Dobremez JF, Camaret S, Bourjot L, Ulrich E, Brêthes A, Coquillard P, Dumé G, Dupouey JL, Forgeard F, Gauberville C, Gueugnot J, Picard JF, Savoie JM, Schmitt A, Timbal J, Trémolières M. RENECOFOR – Inventaire et interprétation floristique de 101 peuplements du réseau (Campagne 1994/95), ONF, Dept des Recherches Techniques 1997 : 513 p.