



HAL
open science

Modélisation de la réponse d'une sapinière sur sol pauvre à des changements de dépôts atmosphériques et de sylviculture

Gregory van Der Heijden

► **To cite this version:**

Gregory van Der Heijden. Modélisation de la réponse d'une sapinière sur sol pauvre à des changements de dépôts atmosphériques et de sylviculture. Milieux et Changements globaux. 2009. hal-02813518

HAL Id: hal-02813518

<https://hal.inrae.fr/hal-02813518>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire en vue d'obtenir le Master 2 GGC spécialité « Connaissance et Gestion des Sols et des Eaux » parcours Recherche

Modélisation de la réponse d'une sapinière sur sol pauvre à des changements de dépôts atmosphériques et de sylviculture

Modeling the response a fir tree stand to atmospheric deposition and sylviculture change



Laboratoire d'accueil :
Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers
Centre INRA de Nancy
Route d'Amance
54280 Champenoux

Responsables de la spécialité CGSE :

Corinne Leyval
Anne Poszwa

Maîtres de stage :

Etienne Dambrine, Arnaud Legout et Manuel Nicolas

Gregory van der Heijden
Soutenance le 22/06/2009 à Nancy

SOMMAIRE

Liste des figures	3
Introduction	4
Matériel et méthodes	5
Présentation du site SP57	5
Méthodes de calcul.....	5
Flux et bilans.....	5
Présentation de NuCM.....	6
Entrées et paramètres du modèle :	9
Construction des scenarii d'évolution future.....	9
Scenarii d'évolution de la déposition atmosphérique.....	10
Scenarii sylvicoles.....	10
Résultats	11
Suivi des concentrations dans les pluviolessivats et les solutions du sol	11
Bilans d'éléments minéraux sur l'écosystème entier	13
Analyses foliaires.....	13
Calibration	14
Résultats des simulations sur le long terme	15
Scenarii d'évolution des dépôts atmosphériques	15
Scenarii sylvicoles.....	16
Mise en évidence des facteurs nutritifs limitant la croissance en faisant varier les dépôts atmosphériques.....	17
Discussion	18
Description de la placette et des dynamiques actuelles	18
Calibration	19
Simulations sur le long terme.....	20
Scenarii d'évolution des dépôts atmosphériques	20
Scenarii sylvicoles.....	21
Carences avérées.....	21
Améliorations possibles du modèle NuCM.....	22
Intérêt de la modélisation face à l'approche bilan.....	23
Conclusion	23
Bibliographie	24
Annexes	26
Résumé	41

Liste des figures

Tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux paramètres à implémenter dans NuCM pour décrire les différents compartiments.....	9
Tableau 2 : Les réserves du sol en cations nutritifs (Ca, Mg et K) par horizon et profil racinaire (données du réseau RENCOFOR)	11
Tableau 3 : Calcul des flux et bilans d'éléments minéraux réalisés sur la période 1996-2007, sur les 70 premiers centimètres du profil. Données exprimées en kg/ha/an. Bilan en soufre calculé par Vingert 2007	13

Graphiques

Graphique 1 : Evolution de la pluviométrie annuelle sur la période de calibration (1996-2007)	11
Graphique 2 : Suivi des concentrations dans les pluviolessivats et dans les solutions de sol à 20 cm et à 70 cm de profondeur	12
Graphique 3 : pH de la solution de sol à 20 cm en fonction de la concentration en nitrate à 20 cm	12
Graphique 4 : Evolution des concentrations foliaires des sapins pectinés de la placette SP 57 sur la période 1993-2007.....	13
Graphique 5 : Comparaison des concentrations simulées par NuCM et celles mesurées dans les pluviolessivats et les solutions de sol à 20cm et 70 cm de profondeur ...	14
Graphique 6 : Evolution de la biomasse sur pied simulée par NuCM en fonction du temps et du scenario de dépôts atmosphériques	15
Graphique 7 : Evolution des concentrations dans les solutions de sol (moyenne des concentrations sur l'ensemble du profil) simulées par NuCM selon les deux scenarii d'évolution des dépôts atmosphérique	16
Graphique 8 : Evolution de la l'accroissement courant annuel simulé par NuCM selon le scenario sylvicole envisagé.	16
Graphique 9 : Evolution des concentrations dans les solutions de sol (moyenne des concentrations sur l'ensemble du profil) simulées par NuCM selon les deux scenarii sylvicoles.....	17
Graphique 10 : Evolution de la l'accroissement courant annuel simulé par NuCM selon un apport d'azote ou de calcium.....	17
Graphique 11 : Répartition en pourcentage des éléments dans les différents compartiments de la biomasse	21

Figures

Figure 1 : Schéma descriptif du fonctionnement du module biogéochimique du modèle NuCM.....	7
---	---

Introduction

Au cours des années 1980, des dépérissements de grande envergure ont été observés dans l'hémisphère Nord, et plus proche de nous dans les Vosges. Ces dépérissements ont été attribués pour partie aux dépôts atmosphériques acides, considérés comme un facteur aggravant. En effet, les dépôts de soufre et d'azote peuvent provoquer une baisse progressive du pH du sol et un lessivage des cations alcalins (Ca, Mg...) dans les sols (Dambrine et al., 1998). Sous l'impulsion d'une forte demande sociale relayée par les politiques, de nombreuses placettes de suivi ont été mises en place pour étudier les effets de ces dépôts acides sur le moyen voire le long terme. Ces placettes ont permis d'ériger des bases de données très complètes, permettant d'identifier des relations de cause à effet entre apports, sylviculture et milieu.

Depuis les années 1980, un effort international significatif a permis de réduire les émissions de polluants acides, notamment le soufre. Cette baisse des émissions se reflète dans les dépôts atmosphériques sur les écosystèmes forestiers, en France (Ulrich et al., 2007) et en Europe (Cooper, 2005). L'évolution des dépôts d'azote est plus mitigée. Sur certains des sites, des diminutions ont été observées (Vuorenmaa, 2004), sur d'autres les dépôts sont restés constants (Cooper, 2005). Une restauration « naturelle » ou au moins une évolution régressive est donc attendue pour les écosystèmes ayant subi une forte charge acide par le passé. Cependant cette baisse des dépôts acides ou acidifiants s'accompagne souvent d'une baisse des dépôts d'éléments nutritifs (Hedin and Likens, 1996) et les conséquences de cette évolution sont probablement plus complexes que prévu. D'autre part, la forêt subit aujourd'hui d'autres pressions. Le climat se réchauffe, allongeant la période de photosynthèse des forêts. Cet allongement va sans doute renforcer l'augmentation de la croissance forestière du Sapin, déjà détectée au cours des années 1980 (Houillier et al., 1995) et cette la tendance devrait s'accélérer au moins pour les sites où les réserves utiles des sols sont élevées. De plus, la crainte d'un réchauffement climatique va accroître l'utilisation d'énergies non fossiles, parmi lesquelles le bois. Depuis le Grenelle de l'environnement en 2007, les politiques forestières se tournent de plus en plus vers une augmentation des exportations de biomasse, pour répondre à une demande croissante en énergies renouvelables.

Apports acides ou acidifiants, exportations accrues, minéralisation des matières organiques du sol, accroissement plus fort sont autant de variables contrôlant l'acidification du sol. Ces principaux phénomènes d'acidification ont été bien étudiés. Désormais nous avons besoin de prédire l'évolution future des écosystèmes acidifiés afin de mieux conseiller les gestionnaires forestiers dans un contexte de grands changements : baisse des dépôts atmosphériques et augmentation de l'exportation de biomasse.

Notre étude porte sur une sapinière installée sur sol brun acide représentative des écosystèmes forestiers des Vosges gréseuses. Il s'agit de la placette Renécofor SP 57 sur laquelle un modèle biogéochimique, NuCM (Nutrient cycling Model) (Munson et al., 1992), a été calibré sur la période de 1996 à 2007. Ce modèle a permis dans un premier temps d'appréhender les cycles biogéochimiques internes à l'écosystème et ainsi de mieux comprendre les dynamiques qui régissent ce système. Dans un second temps, nous avons construit des scénarii vraisemblables d'évolution future : deux scénarii d'évolution des dépôts atmosphériques (un niveau de déposition continue (Scenario A) et une baisse progressive de tous les dépôts (Scenario B)) et deux scénarii sylvicoles (un scénario extensif, les rémanents d'exploitation sont laissés au sol après coupe (Scenario C) et un scénario intensif, exportation de tous les rémanents d'exploitation lors de la coupe (Scenario D)). Ces quatre scénarii ont ensuite été implémentés dans le modèle NuCM et les résultats des simulations sont discutés dans une perspective de gestion durable des forêts et pour souligner les besoins de recherche qu'ils soulèvent.

Matériel et méthodes

Présentation du site SP57

Le site d'étude est une placette du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (Renécofor). C'est une placette d'une superficie d'environ 2 ha divisée en deux zones : une zone centrale clôturée d'environ 0,5 ha où sont effectuées toutes les mesures de suivi et une zone périphérique.

La placette Renécofor SP 57 se situe en forêt domaniale d'Abreschviller (57) dans le massif vosgien. Elle se situe à une altitude de 400 m sur un versant exposé au nord ouest dont la pente moyenne est de 16%. Le peuplement en place, âgé de 60 ans, est composé essentiellement de sapin pectiné (*Abies alba* Miller). Les essences secondaires sont l'épicéa commun (*Picea abies* Karst) et le hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Le sol est un Alocrisol (Baize and Girard, 1995) développé sur un substrat de grès vosgien et dont l'humus est de type oligomull (Brêthes et al., 1997).

Le site a été suivi pour les paramètres suivants :

Une station météo, située à approximativement 500m de la placette, a permis de recueillir depuis 1992 les données quotidiennes complètes : précipitation hors couvert, température (minimum, maximum, moyenne), l'humidité relative, le vent (direction, vitesse) et le rayonnement. Pour combler les valeurs manquantes de la base de données, deux autres stations ont été utilisées (station Météo France (n°dep) du Donon et du Dabo (57)).

La chimie des solutions de sol et des pluviolessivats a été suivie au pas de temps de 28 jours de 1992 à 2007. Les solutions de sol sont collectées à 20cm et à 70cm de profondeur à l'aide de bougies poreuses en céramique auxquelles une dépression est appliquée (maximum 0,6 bar). Cette technique permet de collecter surtout l'eau de drainage et un peu d'eau macro-capillaire, c'est-à-dire de l'eau facilement accessible par les arbres (Ulrich et al., 1998). Elles sont récoltées hebdomadairement puis regroupées par 4 semaines pour leur analyse.

La capacité d'échange cationique (CEC) et le taux de saturation du sol ont été mesurés une première fois à la mise en place de la placette en 1992 (Ponette et al., 1997) puis en 2008 (données non publiées).

Concernant la végétation, le suivi concerne les analyses foliaires réalisées annuellement de 1993 à 2007 ainsi que les analyses de litières associées à des mesures de chutes de litière (une mesure par saison).

Méthodes de calcul

Flux et bilans

Pour estimer la variation de la taille des pools pour les différents éléments, on utilise le principe de conservation de la masse. On calcule les entrées et les sorties de matière du système considéré.

APPORTS par les dépôts atmosphériques : On estime les dépôts secs et occultes à partir de la différence de flux d'éléments hors-couvert et sous couvert et on pose l'hypothèse de l'invariance du sodium, à savoir qu'il n'interagit pas avec la canopée (Ulrich, 1983). On se sert ensuite de cet élément pour calculer les autres éléments qui interagissent avec la canopée.

Les dépôts secs de Na, Cl, NO₃, NH₄ et SO₄ sont calculés par la différence entre le flux sous couvert et le flux hors couvert. Si celle-ci est négative (c.à.d. flux sous couvert < flux hors couvert) alors le dépôt sec est estimé nul.

Pour les dépôts secs de calcium, magnésium et potassium, qui sont connus pour leur interaction avec la canopée (récréation et absorption foliaire) (Ranger et al., 1997), on utilise le rapport (dépôts secs)/(dépôts humides) du sodium.

L'acidité des dépôts est calculée à partir de la différence entre les anions et les cations, de manière à ce que les dépôts totaux soient électriquement neutres.

Les différents flux entre les différents compartiments (récréation foliaire, immobilisation...) de l'écosystème ont été calculés en utilisant la loi de conservation de la masse : $\Delta stock = entrées - sorties$. Les formules de calcul des flux sont présentées en annexe (Annexe 1, p27)

BIOMASSE et minéralomasse : En juin 2007, lors d'une éclaircie du peuplement de la placette SP 57, des mesures dendrométriques et des récoltes d'échantillons de bois, écorce, branches et aiguilles ont été effectuées sur les arbres abattus. A partir de cette base de données, des tarifs de biomasse et de minéralomasse (équations reliant respectivement la biomasse totale ou la masse totale d'un élément chimique à un paramètre dendrométrique facilement mesurable, ici le diamètre à 1,30 m du sol) ont été calibrés avec le logiciel SAS (SAS-Institute, 2002). Ces équations sont de la forme : $minéralomasse = a \times (diamètre_{1,30})^b$, où a et b sont les paramètres ajustés. Une description plus détaillée de la construction de ces tarifs de biomasse et de minéralomasse est donnée en annexe (annexe 2, p28).

L'Office National des Forêts réalise depuis la mise en place de la placette en 1992 des inventaires dendrométriques à intervalles réguliers : 1992, 1995, 1997, 2000, 2004, 2006 et 2008. L'application des tarifs de biomasse et de minéralomasse que nous avons construits à ces inventaires permet de suivre l'évolution de la biomasse sur pied et du pool de chaque élément dans cette biomasse. Lors de cette période, deux éclaircies ont été conduites : 1997 et 2007. Nous disposons d'un inventaire avant et après éclaircie qui nous permet de calculer la biomasse exportée. Avec cette série temporelle, un accroissement en biomasse et en minéralomasse a été calculé. Il faut garder à l'esprit que pour un peuplement forestier, les tarifs de minéralomasse ne sont normalement applicables qu'à des inventaires correspondant à une période de 3 ans autour de la date d'établissement des tarifs. Toutefois, pour un écosystème mature non perturbé, la stabilité relative de la croissance permet d'élargir ce domaine de validité sans risque majeur d'erreur. Nous ne disposons pas d'autre source de données pour le sapin et nous avons donc fait le choix d'utiliser les tarifs pour avoir une approximation de la minéralomasse sur pied.

ALTERATION des minéraux du sol : Des valeurs de flux d'altération ont été obtenues en appliquant le modèle géochimique PROFILE (Sverdrup and Warfvinge, 1988) paramétré en utilisant une minéralogie simplifiée du sol (Party, 1999) et calibré sur la composition chimique des solutions de sols du site (Vingert, 2007).

DRAINAGE : Pour estimer le drainage à la base du profil (au-delà de la zone explorée par les racines), un modèle de bilan hydrique, à compartiments et à flux, BILJOU (Granier et al., 1999), a été calibré grâce à un suivi de l'humidité des sols réalisé au pas de temps mensuel d'avril 2007 à juin 2008 (M. Nicolas données non publiées). Les sorties du modèle BILJOU ont servi par la suite de références pour calibrer le module hydrique de NuCM.

Présentation de NuCM

Parmi les modèles à compartiments et à flux développés au cours des années 1980 et 1990 pour simuler la dynamique des éléments minéraux sous forêt, nous avons choisi d'utiliser le Nutrient Cycling Model (NuCM code version 2.0) (Munson et al., 1992). Ce modèle est abouti et représente l'essentiel des stocks et flux d'éléments minéraux en forêt, tout en limitant le nombre de paramètres implémentés. Il a été calibré et testé sur de nombreux

sites expérimentaux et reproduit dans bon nombre de cas les valeurs observées (Johnson et al., 2000). Le modèle était disponible dans l'Unité puisque M Nicolas et A Legout avaient travaillé avec cet outil en compagnie de son concepteur. Cependant, à ce jour, NuCM n'a jamais été testé sur une série temporelle aussi longue (Johnson et al., 2000). Dans ce modèle, l'écosystème est représenté comme une série de compartiments (sol et biomasse) reliés par des flux.

NuCM est un modèle conceptuel où l'écosystème est simplifié en pools de nutriments : la biomasse (feuilles, tronc et racines), la litière, la solution du sol, la capacité d'échange cationique et anionique et les minéraux du sol. Le modèle simule les flux entre ces pools recréant ainsi leur dynamique. Son fonctionnement est résumé dans le schéma suivant (figure 1).

NuCM est composé de deux modules : un module hydrique et un module biogéochimique. Lors d'une simulation, le module hydrique est utilisé en premier pour déterminer, au pas de temps journalier, les flux d'eau traversant la canopée et le profil du sol, en simulant l'interception, l'évapotranspiration et la circulation d'eau dans le solum. Ces flux d'eau permettent ensuite au module biogéochimique de fonctionner pour calculer, au pas de temps mensuel, les concentrations dans les solutions de sol, les flux d'éléments dans le profil et entre les différents compartiments de l'écosystème.

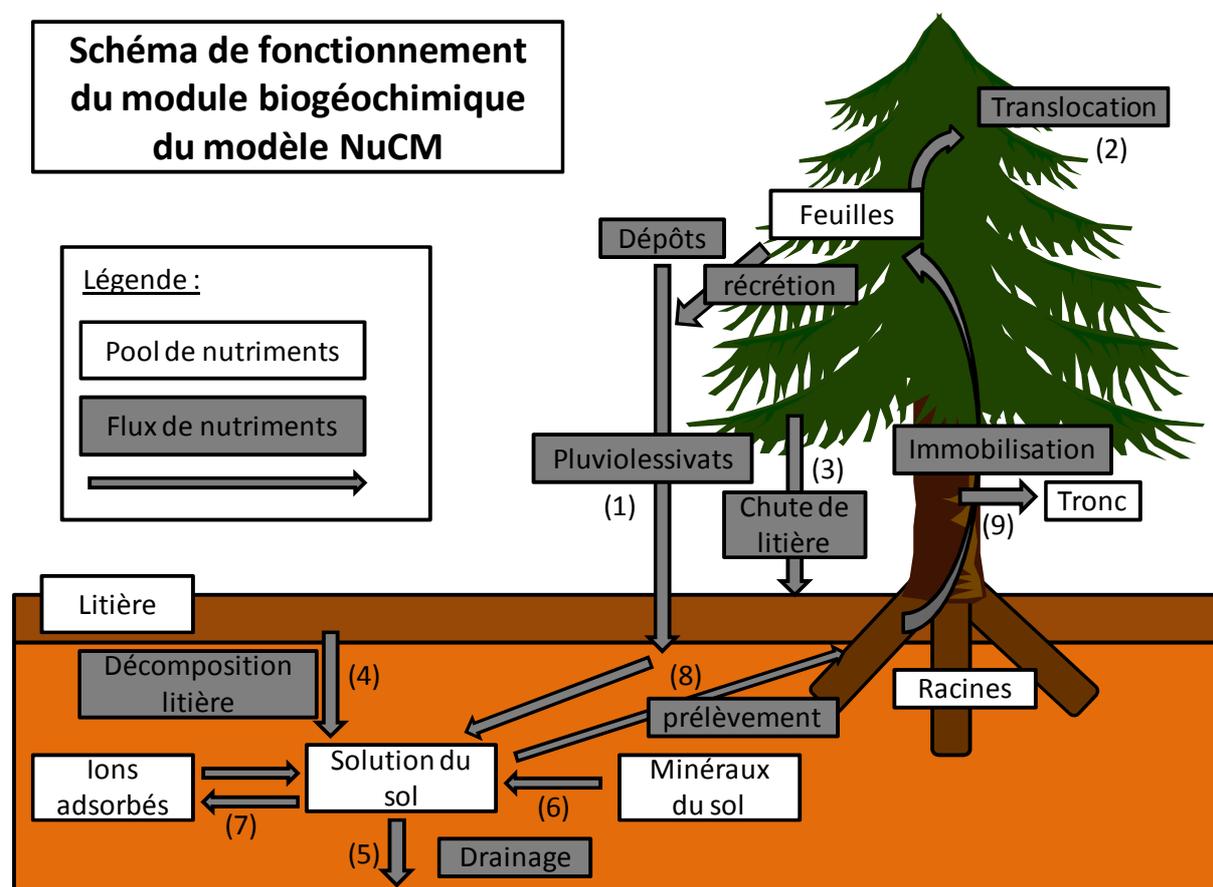


Figure 1 : Schéma descriptif du fonctionnement du module biogéochimique du modèle NuCM

Le peuplement en place est simplifié à une essence feuillue et une essence résineuse (en présence de plusieurs essences du même type, les paramètres de ce peuplement sont obtenus en moyennant les paramètres de chaque essence en fonction de sa couverture surfacique).

Les dépôts atmosphériques interagissent avec la canopée. La composition chimique des pluies au sol (1) est issue de la composition chimique de la pluie incidente, des dépôts secs et occultes et de la récrétion foliaire. L'utilisateur peut implémenter un taux de translocation interne d'éléments (2). Avant l'abscission des feuilles, l'arbre prélève dans le « pool feuilles » des nutriments qui seront utilisés la saison suivante pour la croissance de la biomasse. Les feuilles tombent au sol (3) et forment la litière. Ce dernier pool est divisé en quatre : la litière brute de l'année (OL), la litière fine (OF), l'humus (OH), les acides organiques. Le passage de la matière organique d'un pool à un autre suit une réaction du premier ordre dépendante de la température et de la quantité de matière organique. L'utilisateur implémente les constantes de réaction, influençant ainsi la vitesse de décomposition de la matière organique (4). L'azote est minéralisé sous forme d'ammonium mais peut aussi être stocké dans la matière organique sous forme d'acide organique. L'ammonium peut aussi être nitrifié selon une équation de type Michaelis-Menton (annexe 3, p32).

Le sol est divisé en horizons (10 maximum). La composition chimique de la solution du sol dans chaque horizon est la résultante de plusieurs flux : la composition chimique des eaux de drainage (5) provenant de l'horizon situé directement au-dessus (ou de la pluie au sol pour le premier horizon), le flux d'altération (6), la décomposition de la matière organique (4) (pour le premier horizon), les échanges cationiques et anioniques (7) avec la capacité d'échange et le prélèvement racinaire (8) pour satisfaire la croissance de la biomasse. Le flux d'eau à travers l'horizon calculé par le module hydrique est alors multiplié par les concentrations dans la solution du sol, pour déterminer le flux de drainage de l'horizon.

Le flux d'altération (6) est déterminé par la quantité de minéraux implémentée dans chaque horizon (4 minéraux peuvent être créés sur l'ensemble du profil), de la composition chimique de ces minéraux et de la vitesse de dissolution de chacun de ces minéraux (implémenté par l'utilisateur).

Les échanges cationiques avec la CEC (7) sont régis par des équations de type Gapon (annexe 3, p32). Les constantes thermodynamiques d'équilibre de ces équations sont calculées par l'état initial implémenté.

La relation concentration en solution/concentration adsorbée de phosphate et d'acide organique est supposée linéaire. Les coefficients de cette relation sont calculés par l'état initial. En revanche, l'adsorption de SO_4 suit une isotherme de Langmuir (annexe 3, p32) et l'utilisateur paramètre cette isotherme (concentration adsorbée maximale et concentration à demi-saturation).

Le prélèvement racinaire (8) est déterminé par la croissance de la biomasse et par la disponibilité des nutriments. L'utilisateur implémente une croissance potentielle en fonction de l'âge du peuplement. Il n'y a pas de modèle de croissance en tant que tel dans NuCM. Les concentrations dans les différents organes des arbres sont considérées comme constantes au cours du temps. Le prélèvement nécessaire à la bonne croissance du peuplement correspond au produit de la croissance potentielle en biomasse et de la concentration pour chaque élément dans cette biomasse. Lorsque les éléments minéraux ne sont pas en quantité limitante, la croissance n'est pas limitée et la concentration dans les tissus reste identique. Le prélèvement racinaire est ensuite alloué aux différents organes de l'arbre (9) (racines, tronc et feuilles). En revanche, lorsque l'on se trouve en situation de carence en un ou plusieurs éléments, la croissance en biomasse n'atteint pas la croissance potentielle et le prélèvement est réduit (l'arbre prélève le maximum de nutriments disponibles jusqu'à ce qu'un élément devienne limitant). L'utilisateur a la possibilité d'implémenter un paramètre permettant une certaine diminution des concentrations dans les tissus végétaux avant que la croissance ne devienne limitée.

Entrées et paramètres du modèle :

Le modèle requiert, pour son fonctionnement, des données météorologiques quotidiennes (pluie incidente, températures minimale et maximale, couverture nuageuse, point de rosée, pression atmosphérique et vitesse du vent) et les données de dépôts atmosphériques mensuels pour chaque élément (SO_x , NO_x , H^+ , NH_4 , Al_{tot} , Ca, Mg, K, Na, SO_4 , NO_3 , Cl, PO_4 , ANC, carbone organique dissous, carbone inorganique dissous, Al_{org} , SiO_2).

Le modèle requiert aussi des paramètres qui caractérisent le sol, la matière organique du sol et la biomasse sur pied. Les principaux paramètres servant à la description des différents compartiments sont listés dans le tableau suivant (Tableau 1). Une description détaillée des différents paramètres, fichiers « input » et du fonctionnement du modèle est donnée dans la littérature (Munson et al., 1992; Kvindesland, 1997).

Pour certains de ces paramètres des valeurs mesurées ont été utilisées. C'est le cas notamment de la composition chimique des aiguilles. Dans d'autres cas, les mesures n'avaient pas été effectuées (facteur de conversion LAI/masse de feuilles) ou bien le paramètre en question ne correspondait à aucune mesure possible (paramètres cinétique de décomposition de la litière, translocation, récréation). Pour ces paramètres, une valeur a été ajustée en utilisant d'autres mesures pour que les simulations du modèle se rapprochent au mieux de la réalité. Par exemple, la récréation est ajustée pour que les pluviollessivats simulés correspondent aux mesures. La translocation est ajustée pour que le flux d'éléments dans la chute de litière corresponde aux mesures. La décomposition de la litière est ajustée pour que le pool litière reste constant sur la période de calibration.

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux paramètres à implémenter dans NuCM pour décrire les différents compartiments. Les paramètres ajustés sont indiqués en italique

Compartiment décrit	Principaux paramètres
Placette	Surface totale, pente, longitude, latitude
Végétation en place	LAI, % surfacique de feuillus et de résineux, <i>interception</i> , coefficient d'ajustement de l'ETP, biomasse sur pied, <i>facteur de conversion LAI/masse de feuilles</i> , prélèvement mensuel de nutriments, chute mensuelle de litière, <i>translocation par élément</i> , composition chimique des feuilles, du tronc et des racines
Litière	Fraction initiale de matière organique dans le premier horizon, <i>constante de dégradation de la litière</i> , <i>fraction d'ions directement lessivables</i> , <i>fraction de S et N minéralisés lorsque la litière est décomposée en litière fine</i> , <i>humus et acides organiques</i>
Sol (par horizon)	Nombre d'horizons, épaisseur de l'horizon, % de racines, % d'humidité massique à saturation et à la capacité au champ, <i>conductivité hydraulique</i> , composition chimique des minéraux présents, <i>vitesse de dissolution</i> , fraction massique des différents minéraux/horizon, <i>CEC totale</i> , saturation de la CEC, <i>coefficients d'adsorption des sulfates</i> , densité apparente, % (par élément) de prélèvement par horizon

Construction des scénarii d'évolution future

Pour simuler l'évolution future de l'écosystème et pour tester la réponse de l'écosystème face aux perturbations extérieures plusieurs scénarii ont été élaborés. Nous avons construit deux scénarii d'évolution des dépôts atmosphériques et deux scénarii sylvicoles : (A) niveau de dépôts actuel maintenu constant pendant 100 ans, (B) baisse de tous les dépôts sur une période de 100 ans suivant la tendance observée sur la période 1996-

2007, (C) coupe d'exploitation traditionnelle à 120 ans en laissant les rémanents au sol, enfin (D) coupe d'exploitation du peuplement à 120 ans en exportant tous les rémanents. Les rémanents sont tous les résidus d'exploitations (branches de petit diamètre et feuilles). Dans les deux scénarii sylvicoles, la régénération d'un nouveau peuplement jusqu'à l'âge de 30 ans est simulée. Ces scénarii recouvrent la période de 1996 à 2095. Le fichier « données météo » a été construit à partir de la valeur moyenne des différentes variables sur la période de calibration de 1996 à 2007. Ces moyennes ont été réalisées mensuellement pour conserver une saisonnalité climatique.

Scénarii d'évolution de la déposition atmosphérique

Pour le scénario à dépôts constants (Scenario A), une moyenne mensuelle calculée sur les trois dernières années de la période de calibration (2005-2007) est projetée sur toute la période de simulation.

Le scénario de baisse de tous les dépôts atmosphériques (Scenario B) est construit selon la tendance observée sur la période de calibration. Les dépôts totaux sur la période 1996-2007 sont présentés en annexe (annexe 4, p33). Une courbe est ajustée pour prédire les dépôts soufrés sur la période de calibration en fonction du temps. L'évolution de cette courbe (fonction puissance décroissante : $f(X)=aX^b$) permet de définir la diminution future. La diminution des dépôts pour tous les autres éléments est calculée proportionnellement à la baisse de dépôts soufrés. De plus, pour chaque élément, une moyenne mensuelle des dépôts sur la période de calibration est calculée. La baisse est appliquée à ces moyennes mensuelles, conservant ainsi dans le scénario la saisonnalité des dépôts.

L'évolution des dépôts totaux pour tous les éléments et pour les deux scénarii est présentée en annexe (annexe 5, p34 ; annexe 6, p35)

Scénarii sylvicoles

Les deux scénarii sylvicole ont été simulés avec le scénario (A) de dépôts constants sur 100 ans. Pour simuler la croissance du peuplement jusqu'à l'âge d'exploitation (120 ans), nous avons utilisé des tables de production pour le Sapin (table de Duplat 1978 dans Vanrière, 1984). On utilise la hauteur dominante du peuplement à un âge constant pour déterminer la classe de productivité. On utilise ensuite la courbe de production totale de la table (cumul du volume sur pied et du volume exporté en éclaircie en fonction de l'âge). La croissance calculée à partir de ces tables est une croissance potentielle sur ce type de station. Le peuplement simulé est un peuplement moyen et non plus un peuplement réel.

On ne simule pas les réductions de biomasse sur pied (éclaircies préconisées par la table) puisque la croissance est implémentée directement dans NuCM par l'utilisateur : NuCM ne dispose pas de modèle de croissance et donc la densité en nombre de tiges du peuplement simulé n'influence pas sa croissance. Les retours au sol de rémanents lors d'éclaircies ne sont pas simulés non plus. Dans notre cas, nous rappelons que les rémanents sont définis comme toute partie de l'arbre autre que le tronc. A partir de 30 ans, on considère que la biomasse de la canopée est constante au cours du temps et que la fermeture de la canopée après une éclaircie est assez rapide (3 à 5 ans) : les nutriments libérés au cours de la décomposition de ces rémanents d'éclaircie sont vite immobilisés au cours de la croissance de la canopée et jusqu'à sa fermeture.

Après coupe, pour estimer l'immobilisation dans le tronc, nous avons utilisé les concentrations moyennes mesurées sur le peuplement de 60 ans bien que ces concentrations ne soient théoriquement pas valables tout au long de la vie du peuplement. Nous avons appliqué ces concentrations à la biomasse sur pied donnée par la table de production. Ces nutriments ont été immobilisés durant 30 ans et cette immobilisation est supposée linéaire au cours des 30 ans.

Lorsque les rémanents ne sont pas exportés lors de la coupe d'exploitation du peuplement (Scenario C), le sol se retrouve enrichi par leur décomposition. Cet enrichissement n'est que de courte durée : au bout de 30 ans la canopée est fermée et on estime que l'excédent de nutriments apporté par les rémanents est immobilisé dans la nouvelle biomasse foliaire. Lorsque l'on raisonne en bilan sur le système sol et sur les 30 ans après la coupe :

$$\Delta \text{stock du sol} = (\text{décomposition rémanents})_{\text{input}} - (\text{immobilisation canopée} + \text{immobilisation tronc})_{\text{output}}$$

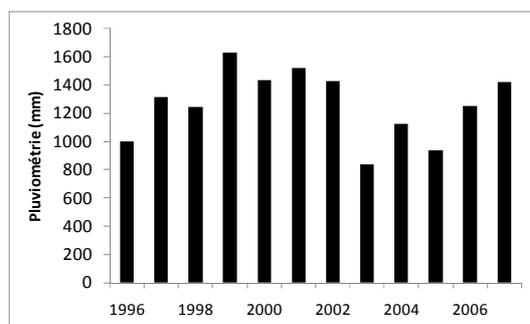
Nous estimons que le stock de nutriments libérés par la décomposition des rémanents est équivalent à l'immobilisation nécessaire à la formation de la canopée : ces deux flux s'annulent donc dans le bilan et on simplifie le système en les négligeant. On implémente une croissance équivalente au stock à 30 ans de nutriments contenus dans le compartiment tronc de la biomasse.

En revanche, dans le scénario d'exportation des rémanents, la minéralomasse du houppier est exportée et ne retourne pas au sol. On implémente alors une croissance équivalente au stock à 30 ans de nutriments contenus dans le compartiment tronc et canopée de la biomasse (minéralomasse contenue dans la canopée à 30 ans estimée comme égale à la minéralomasse de la canopée à 60 ans).

Résultats

Tableau 2 : Propriétés des horizons de sol de la placette SP 57 : densité apparente, réserves échangeables et totales en cations nutritifs (Ca, Mg et K) et profil racinaire (données du réseau RENCOFOR)

Horizon	Densité apparente	Profondeur min	Profondeur max	% racines fines	Ca		Mg		K	
					échangeable (kg/ha)	total (kg/ha)	échangeable (kg/ha)	total (kg/ha)	échangeable (kg/ha)	total (kg/ha)
F1 A	0.97	0.00	8	19	40.8	1292.7	7.2	367.8	29.6	1008.7
F1 A/S	1.10	8.00	17	11	11.8	686.1	3.2	564.5	14.5	1324.7
F1S1	1.18	17.00	69	51	67.3	3239.4	15.8	5433.9	76.9	8697.9
F1S2	1.37	69.00	120	10	88.2	4235.1	18.4	8125.2	103.0	10352.5
F1C	1.58	120.00	150	8	50.1	2002.7	10.2	5185.3	90.4	8441.2



Graphique 1 : Evolution de la pluviométrie annuelle sur la période de calibration (1996-2007)

Le régime hydrique est relativement stable sur l'ensemble de la période (Graphique 1) avec néanmoins une pluviométrie moindre pour les années 1996, 2003 et 2005. La pluviométrie moyenne est de 1200 mm/an.

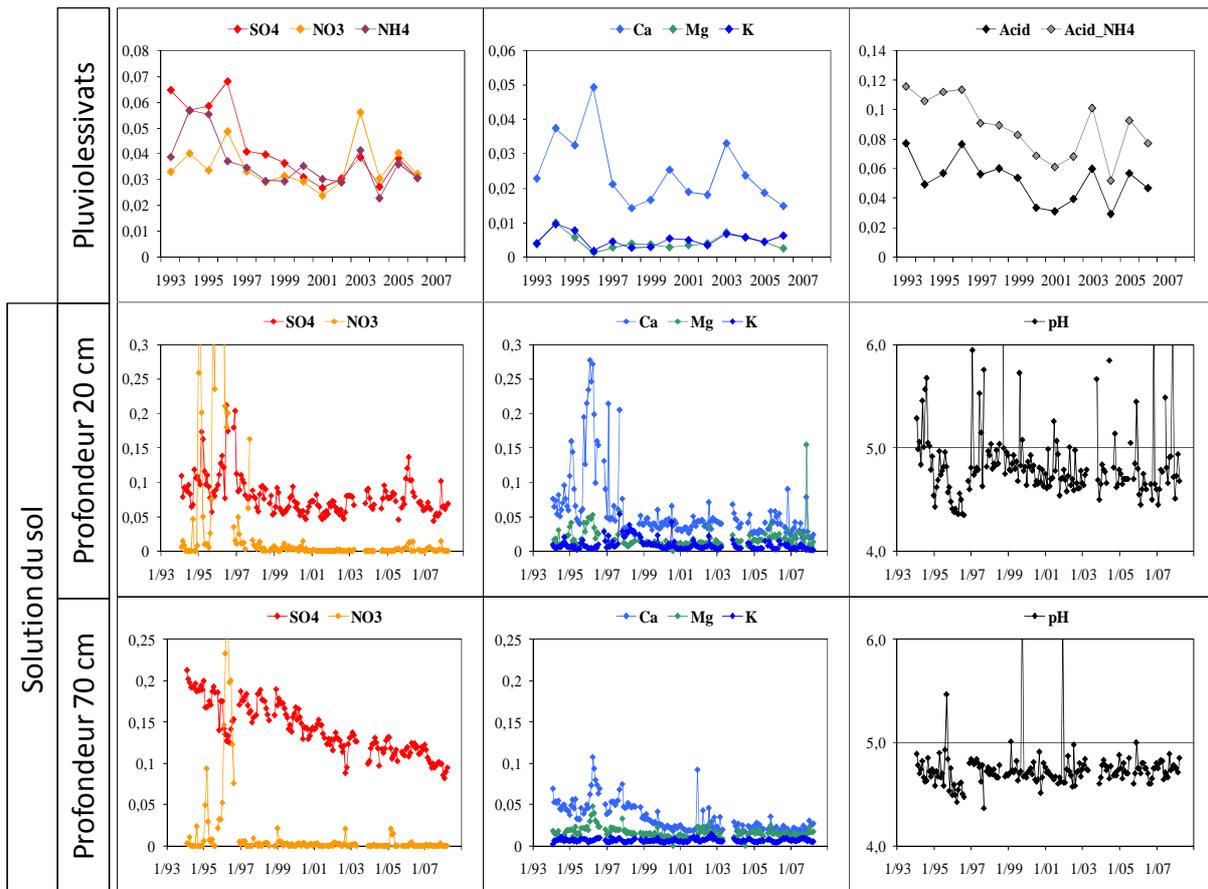
Suivi des concentrations dans les pluviollessivats et les solutions du sol

Les concentrations mesurées dans les pluviollessivats et les solutions de sol pour les différents éléments (SO₄, NO₃, Ca, Mg, K et pH) sont représentées dans le Graphique 2.

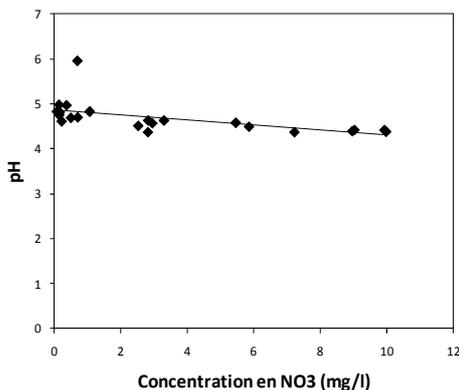
On observe une nette tendance à la baisse de [SO₄] dans les pluviollessivats sur la période d'étude. [NO₃], [NH₄] et [Ca] diminuent aussi mais la tendance est moins marquée. En revanche, [Mg] et [K] restent constants. Il en résulte une diminution de l'acidité générale des pluviollessivats.

[NH₄] dans les solutions du sol est nulle à 20 cm comme à 70 cm. A 20 cm de profondeur, [NO₃] est quasi-nulle exceptée quelques pics en 1995 et 1996. [SO₄] diminue sur l'ensemble de la période. [Ca] et [Mg] diminuent également sur l'ensemble de la période et on observe des pics en 1995 et 1996. Ce pic est très marqué pour le calcium et plus faible pour le magnésium. Seul le potassium reste globalement stable. Le pH de la solution du sol est relativement bas (en dessous de 5). Le pH diminue d'environ 0,3 unité pH au cours des 15 ans et on observe une baisse marquée en 1996. Cette baisse est corrélée au pic de nitrate (Graphique 3).

A 70 cm de profondeur, [NO₃] est quasi-nulle mais on retrouve les mêmes pics qu'à 20 cm en 1995 et 1996. On observe une nette diminution de [SO₄], [Ca] et [Mg] sur la période. [K] reste stable sur la période. Le pH reste globalement stable, mais on observe une forte baisse en 1996. Le pH reste en dessous de 5.



Graphique 2 : Suivi des concentrations dans les pluviollessivats et dans les solutions de sol à 20 cm et à 70 cm de profondeur pour les éléments majeurs (SO₄, NO₃, Ca, Mg et K). Suivi de l'acidité de ces solutions sur la période 1993-2007 pour les pluviollessivats et sur la période 1994-2007 pour les solutions du sol (bougies poreuses mises en place en décembre 1992). Les concentrations et l'acidité des dépôts sont exprimées en mmolc.l⁻¹



Graphique 3 : pH de la solution de sol à 20 cm en fonction de la concentration en nitrate à 20 cm (données du réseau RENECOFOR)

Le pic de NO₃ dans les solutions du sol n'est pas précédé d'un pic de NO₃ dans les dépôts atmosphériques et pourrait donc être dû à un épisode de forte nitrification pour lequel nous n'avons pas d'explication quant à son déclenchement. Il pourrait aussi s'agir d'une perturbation ponctuelle (chute d'un arbre) ou d'une conséquence de la sécheresse

en 1996 (décalage temporel entre l'activité de la faune du sol et de la végétation). Le modèle n'étant pas capable de simuler ces épisodes, nous avons choisi de calibrer le modèle sur la période 1996-2007.

Bilans d'éléments minéraux sur l'écosystème entier

Les bilans d'éléments minéraux ont été calculés sur la période 1997-2007 (moyenne des bilans annuels) pour d'une part, un écosystème entier (le système considéré comprend le sol et le peuplement) et d'autre part pour le système sol.

Kg/ha/an	Ca	Mg	K	N	S
Entrées					
Dépôts	7.6	0.9	2.5	11.1	9.1
Altération	0.3	0.3	6.2	0.0	0.0
Sorties					
Exportation biomasse	1.6	0.1	1.7	1.6	1.0
Drainage 70 cm	4.6	1.4	2.0	0.2	17.9
Bilan					
Ecosystème entier	1.8	-0.4	4.9	9.3	-9.7
Sol	-4.2	-0.9	-0.1	-1.9	-10.5
Flux Internes					
Immobilisation	7.5	0.6	6.7	12.7	
Chute de litière	13.3	0.8	3.9	33.7	
(Récration-adsorption)net	-0.9	0.7	17.5	-3.0	
Prélèvement racinaire	19.8	2.1	28.1	43.4	
Stocks dans le sol (kg/ha)					
	Echangeable		Total		
0-20 cm	53	10	44	1475	
0-70 cm	120	26	121	3266	

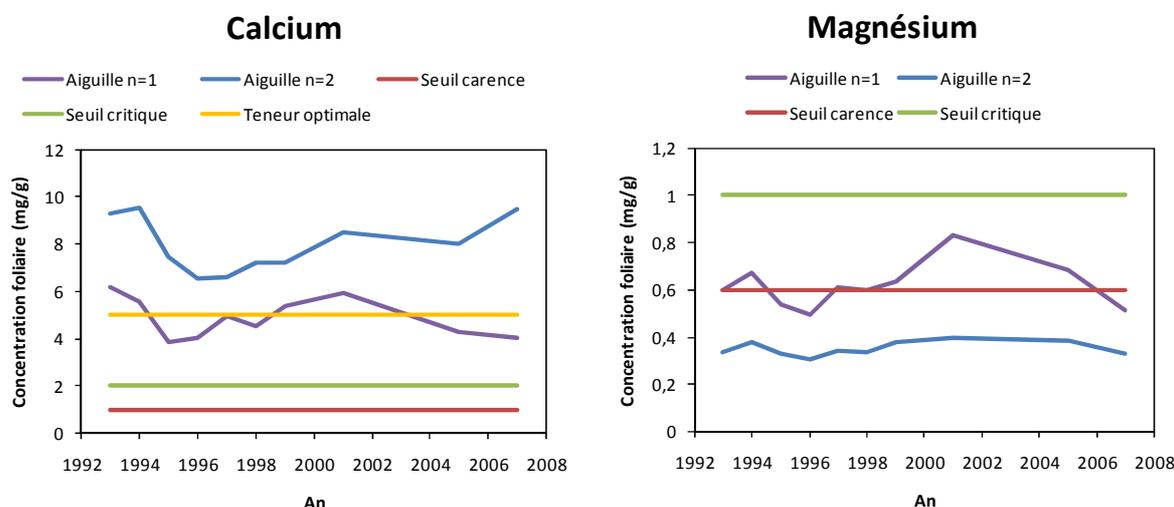
Le bilan est négatif pour les quatre éléments (Ca, Mg, K et N) lorsqu'on considère le système sol. Le sol s'appauvrit donc en ces éléments. En revanche, le bilan n'est plus négatif pour Ca, K et N lorsqu'on intègre le compartiment végétal dans le bilan. Ces éléments s'accumulent dans la biomasse. Nous n'avons pas de données pour calculer une immobilisation de soufre. Les valeurs d'exportation

Tableau 3 : Calcul des flux et bilans d'éléments minéraux réalisés sur la période 1996-2007, sur les 70 premiers centimètres du profil de sol. Données exprimées en kg.ha⁻¹.an⁻¹. Bilan en soufre calculé par Vingert 2007

de soufre ont été estimées par Vingert (2007) à partir de tarifs de minéralomasse pour l'épicéa commun dans les Vosges (Le Goaster, 1989).

Les calculs de flux montrent une récréation foliaire nette pour Mg et K et une absorption foliaire nette d'azote. Ces résultats sont en accord avec d'autres études (Ranger et al., 1997). En revanche, nos calculs montrent une absorption foliaire de Ca, ce qui est inhabituel. Les valeurs d'immobilisation annuelle dans la biomasse calculées ici par comparaison d'inventaire sont relativement proches des valeurs de déposition atmosphérique.

Analyses foliaires



Graphique 4 : Evolution des concentrations foliaires des sapins pectinés de la placette SP 57 sur la période 1993-2007 (Données du réseau RENECOFOR). Valeurs seuil de carence, critique et optimale selon Bonneau (1995).

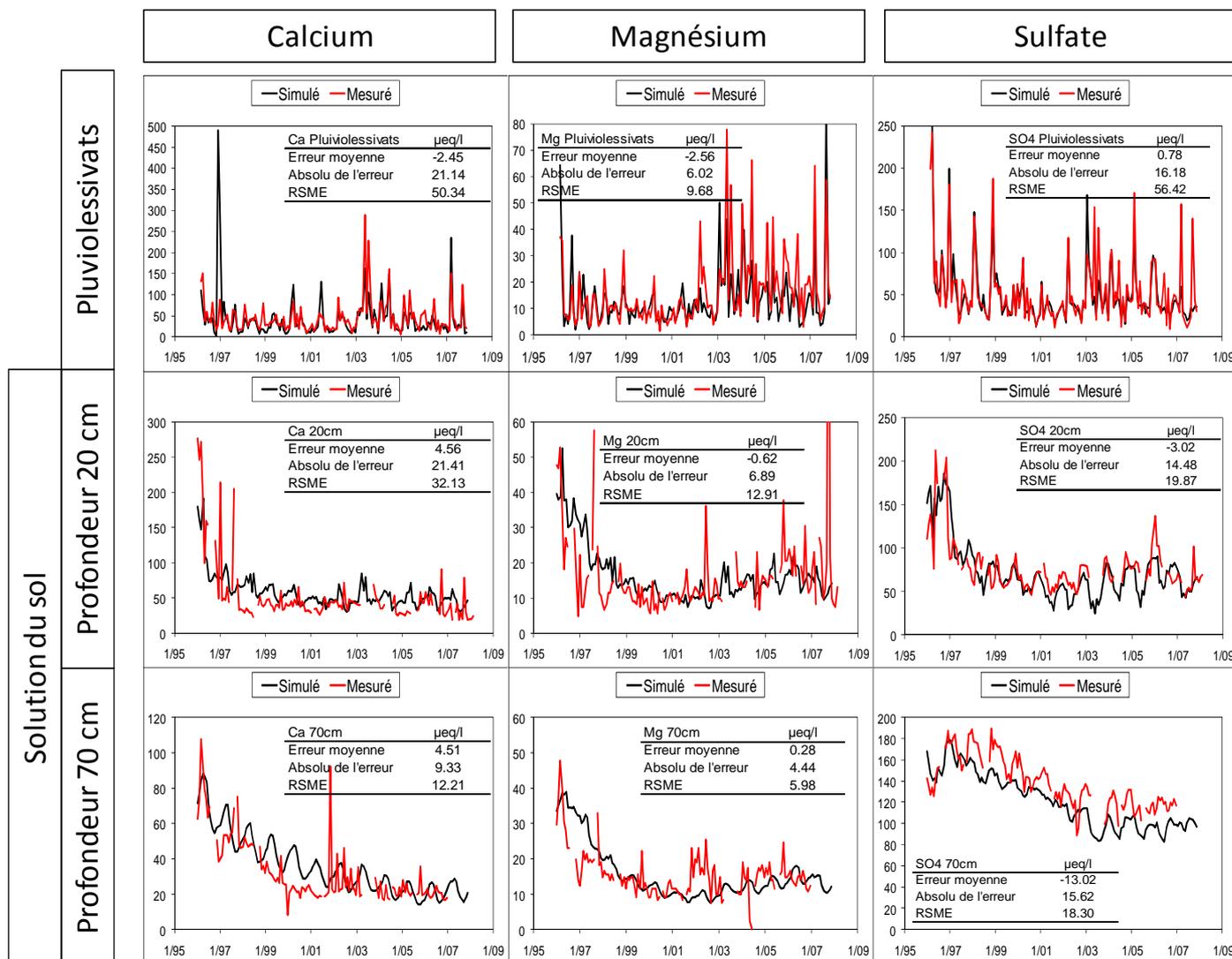
Les résultats des analyses foliaires pour le Ca et le Mg sont présentés dans le **Graphique 4**. Les analyses foliaires pour les autres éléments sont présentées en annexe (**annexe 7**, p36).

[Ca] dans les aiguilles sont supérieures à la concentration optimale (Bonneau, 1995). Les aiguilles de 2 ans sont plus concentrées que les aiguilles de l'année et sont bien au-dessus de la concentration optimale.

[Mg] sont systématiquement en dessous du seuil de carence pour les aiguilles de 2 ans tandis que pour les aiguilles de l'année, la concentration varie autour de cette valeur seuil.

Calibration

Les résultats de la calibration sont présentés dans le **Graphique 5**. Seuls les résultats de calibration pour Ca, Mg et SO₄ seront présentés ici. L'ensemble des résultats est présenté en annexe (**annexe 8**, p37 ; **annexe 9**, p38). Nous avons choisi d'utiliser les concentrations dans les pluviollessivats et les solutions du sol pour présenter la qualité de la calibration. En effet, le pool « solution de sol » est la résultante de tous les autres flux dans le système et régit la nutrition du peuplement.



Graphique 5 : Comparaison des concentrations simulées par NuCM à celles mesurées dans les pluviollessivats et les solutions de sol à 20cm et 70 cm de profondeur pour Ca, Mg et SO₄ (données du réseau RENECOFOR). Les concentrations sont exprimées en µeq.l⁻¹

Les concentrations simulées dans les pluviolessivats et les solutions du sol suivent les mêmes tendances que celles mesurées sur la période de calibration. Le modèle est capable de reproduire la diminution observable pour les trois éléments en début de période dans les solutions du sol mais il est aussi capable de reproduire la légère augmentation en fin de période pour Mg et SO₄.

En revanche, le modèle ne reproduit pas sur un pas de temps fin (saison, interannuel et pics soudains) la variabilité des concentrations mesurées et NuCM tend à conserver une variabilité saisonnière en profondeur que l'on ne retrouve pas dans les mesures.

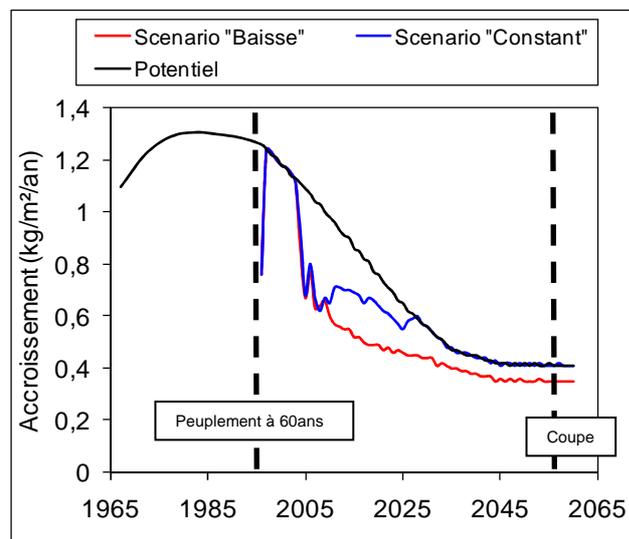
L'erreur moyenne entre les distributions des valeurs simulées et mesurées est proche de 0 pour ces trois éléments et pour ces trois flux. La valeur absolue de l'erreur est faible : les valeurs simulées sont proches de celles mesurées.

Résultats des simulations sur le long terme

Scenarii d'évolution des dépôts atmosphériques

L'évolution de la croissance en biomasse, selon le scénario de dépôts envisagé, simulée par NuCM est présentée dans le Graphique 6.

Sur la période 1996-2060, la croissance implémentée décroît progressivement au cours du temps (effet âge).

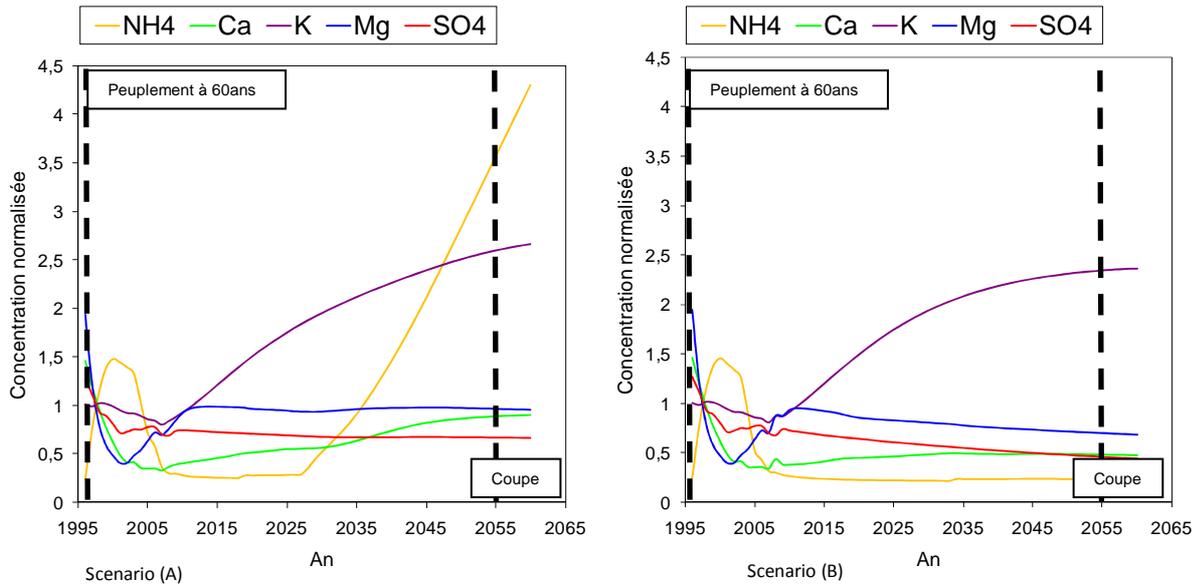


Graphique 6 : Evolution de l'accroissement courant annuel simulé par NuCM en fonction du temps et du scénario de dépôts atmosphériques (Dépôts constants « Scenariio A » et baisse des dépôts « Scenariio B »). L'accroissement courant annuel potentiel est calculé à partir de la table de production pour le sapin (Vannière, 1984)

L'évolution des concentrations dans les solutions du sol est présentée dans le Graphique 7. Les concentrations ont été normalisées en utilisant la valeur moyenne des concentrations sur les 5 premières années de la simulation. La croissance simulée par NuCM deviendrait limitée par une carence nutritive au bout de 10 ans quelque soit le scénario considéré. Dans le scénario (A), après cette première chute, la croissance simulée resterait stable pendant environ 20 ans. Puis, le peuplement retrouverait l'accroissement potentiel (non limité) à partir de 2030. Dans le scénario

(B), la baisse des dépôts induirait une carence plus forte. La croissance simulée serait moindre par rapport au scénario (A). De plus, l'accroissement serait toujours inférieur à sa valeur potentielle même en fin de vie du peuplement lorsque la croissance ralentit. Le peuplement serait en état de carence permanent.

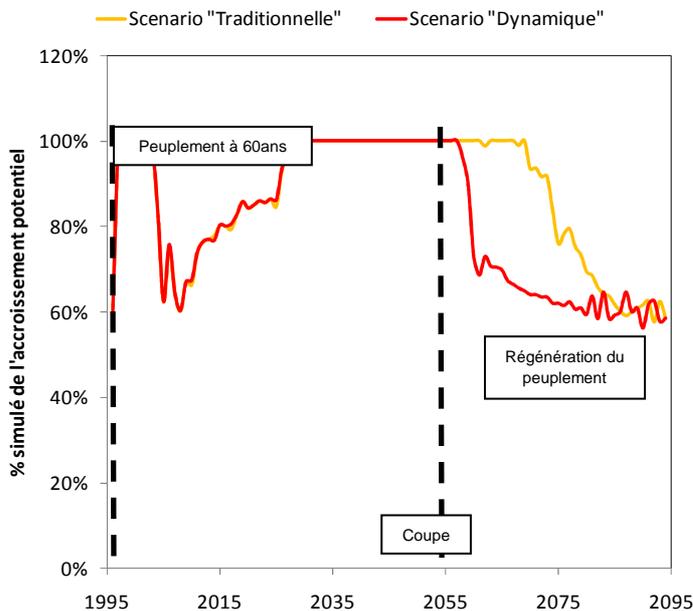
Quel que soit le scénario considéré, [K] augmenterait fortement et [SO₄] diminuerait lentement tout au long de la simulation. [Ca] augmenterait dans les deux scénarii mais cette augmentation serait plus faible si les dépôts atmosphériques diminuent. [Mg] diminuerait quelque soit le scénario mais diminuerait plus rapidement si les dépôts diminuent. [NH₄] resterait constante tant que la croissance potentielle est forte. Lorsque la croissance diminue par effet âge, l'azote ne serait plus limitant dans le scénario (A), la croissance ne serait pas limitée et les excès d'azote seraient stockés dans le système. Ce stockage est pour partie dû à un artéfact lié au modèle. Vu [NH₄] dans les pluviolessivats, celui-ci s'échange préférentiellement avec la capacité d'échange dans les premiers horizons. Dans le scénario (B), l'azote est toujours limitant et sa concentration en 2030 reste basse.



Graphique 7 : Evolution des concentrations dans les solutions de sol (moyenne des concentrations sur l'ensemble du profil) simulées par NuCM selon les deux scénarii d'évolution des dépôts atmosphériques : scénario (A) « dépôts constants » à gauche et scénario (B) « baisse de tous les dépôts » à droite. Les concentrations sont normalisées par la valeur moyenne des solutions du sol sur l'ensemble du profil calculée sur les 5 premières années de la simulation (1996-2000).

Scénarii sylvicoles

L'évolution de la croissance en biomasse selon le scénario sylvicole envisagé, simulée par NuCM, est présentée dans le **Graphique 8**.



Graphique 8 : Evolution de l'accroissement courant annuel simulé par NuCM selon le scénario sylvicole envisagé. Scénario (C) « traditionnelle » et scénario (D) « dynamique ». L'accroissement est représenté en pourcentage de l'accroissement potentiel implémenté dans NuCM (accroissement lorsque le peuplement n'est pas limité)

La croissance dans les deux scénarii évoluerait de la même manière jusqu'à la coupe d'exploitation du peuplement.

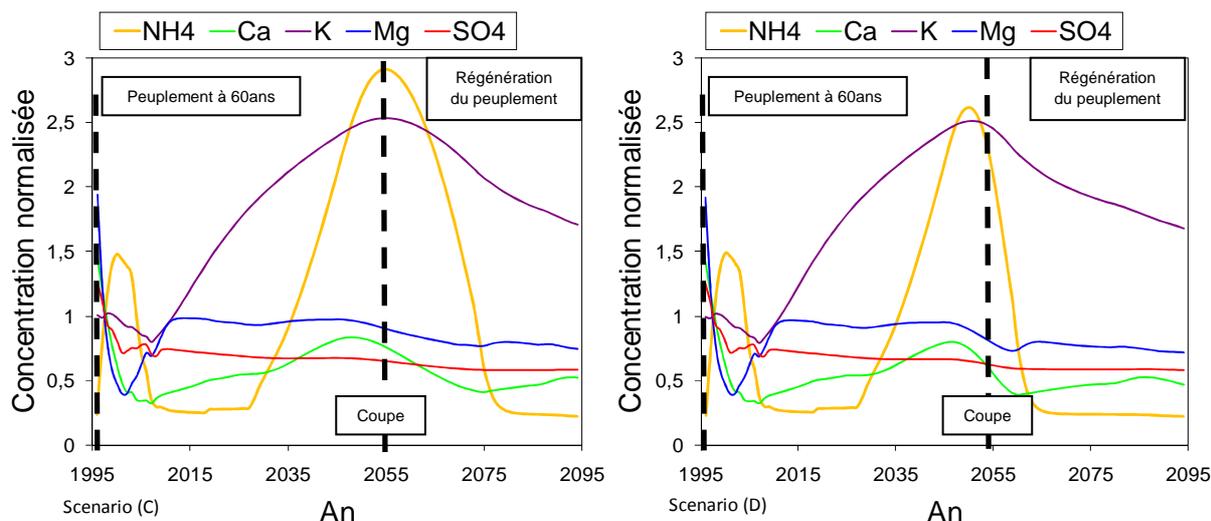
Dans les deux scénarii, la croissance ne serait pas limitée après la coupe. L'exportation des rémanents engendrerait un appauvrissement du sol et la croissance deviendrait limitée au bout de 10 ans. Si les rémanents étaient laissés au sol, la croissance deviendrait limitée au bout de 20 ans.

L'évolution des concentrations dans les solutions du sol est présentée dans le **Graphique 9**.

Jusqu'à la coupe (2055), les concentrations dans les solutions du sol ont la même dynamique que celle décrite pour le Scénario (A) quel que soit le scénario sylvicole

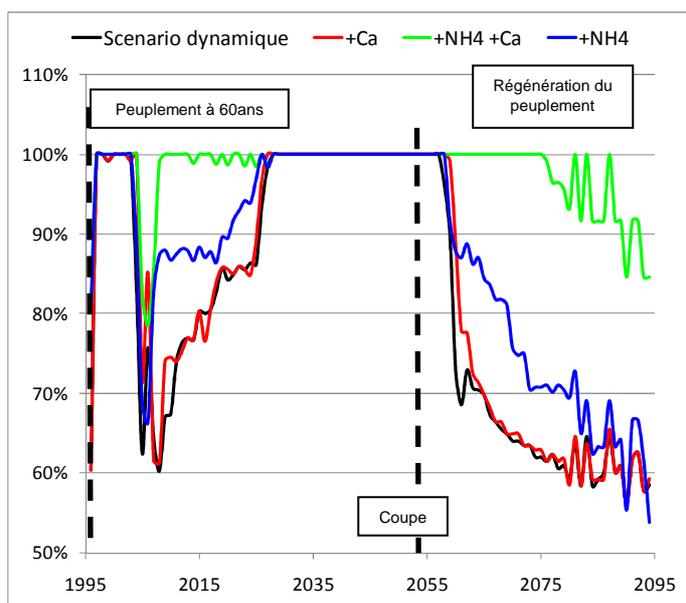
envisagé. Après la coupe, les dynamiques seraient différentes selon le scénario simulé. Les maxima observés pour [K] et [NH₄] seraient plus importants dans le scénario (C). Les concentrations diminueraient pour tous les éléments mais dans le scénario (D), cette baisse serait plus rapide. [NH₄] diminuerait (durant 20 ans pour le scénario (C) et durant seulement 10 ans pour le scénario (D)) jusqu'à ce que la croissance devienne limitée par une nouvelle carence azotée. Dès lors que la croissance est limitée, [Ca] augmenterait à nouveau mais [K],

[Mg] et [SO₄] continueraient à diminuer. Les concentrations finales pour ces cations nutritifs seraient légèrement plus importantes dans le scénario (C).



Graphique 9 : Evolution des concentrations dans les solutions de sol (moyenne des concentrations sur l'ensemble du profil) simulées par NuCM selon les deux scénarii sylvicoles, scénario (C) « traditionnelle » sans exportation des rémanents à gauche et scénario (D) « dynamique » avec exportation des rémanents à droite. Les concentrations sont normalisées par la valeur moyenne des solutions du sol sur l'ensemble du profil calculée sur les 5 premières années de la simulation (1996-2000).

Mise en évidence des facteurs nutritifs limitant la croissance en faisant varier les dépôts atmosphériques



Graphique 10 : Evolution de l'accroissement courant annuel simulé par NuCM selon un apport d'azote ou de calcium. L'accroissement est représenté en pourcentage de l'accroissement potentiel implémenté dans NuCM (accroissement lorsque le peuplement n'est pas limité). +Ca (ajout de 7 kg/ha/an de Ca), +NH₄ (ajout de 10 kg/ha/an de NH₄) et +NH₄+Ca (ajout de 7 kg/ha/an de Ca et 10 kg/ha/an de NH₄)

Pour déterminer la carence nutritive qui limite la croissance dans les simulations de NuCM, nous avons augmenté les concentrations dans les solutions du sol (en augmentant les concentrations dans les dépôts atmosphériques) en procédant élément par élément. Les résultats de ces manipulations sont présentés dans le **Graphique 10**.

Notre scénario de référence est le scénario (D) avec des dépôts constants sur 100 ans (A). L'apport de Ca augmenterait légèrement la croissance lors des périodes de carences. L'apport de NH₄ augmenterait plus fortement la croissance mais il faudrait apporter les deux éléments pour obtenir une croissance non limitée sur la quasi-totalité de la période simulée. L'azote serait l'élément le plus limitant dans notre système mais Ca serait aussi un facteur limitant la croissance.

Discussion

Description de la placette et des dynamiques actuelles

Le sol de la placette SP 57 est désaturé en Ca et en Mg : 120 kg/ha de Ca, 25 kg/ha de Mg et 120 kg/ha de K dans les 70 premiers centimètres. Une baisse des dépôts de cations nutritifs devrait donc avoir un impact relativement rapide et marqué sur les stocks échangeables du sol.

Le régime hydrique étant stable sur l'ensemble de la période, les tendances observées pour les concentrations des éléments en solution dans les différents compartiments de l'écosystème peuvent être considérées comme un bon indicateur des tendances pour les flux d'éléments.

Bien que l'acidité des dépôts atmosphériques diminue au cours du temps, la placette SP 57 reste un écosystème sensible. En effet, les solutions du sol en profondeur (70 cm) s'appauvrissent en calcium. De plus, le pH diminue en réponse à une augmentation de la concentration en anions dans la solution du sol. Ceci reflète un très faible pouvoir tampon du sol.

Le sol de la placette subit encore aujourd'hui une acidification. Les « bases » échangeables, notamment Ca et Mg, sont encore très fortement lessivées dans le profil et il en résulte un écosystème qui s'appauvrit annuellement en magnésium. De plus, pour ces deux éléments, l'immobilisation annuelle dans la biomasse est proche du niveau actuel de dépôts atmosphériques. L'absorption foliaire de Ca résulte peut-être d'un artéfact dû à l'utilisation du Na comme invariant dans le calcul des dépôts (Ulrich, 1983). Son invariance peut être remise en cause dans certains écosystèmes. Une absorption foliaire de Ca a, par exemple, été observée dans une hêtraie de plaine en Bretagne (Legout, 2008). Une manipulation de traçage isotopique de Ca permettrait de préciser si ce flux est réel ou si l'absorption foliaire mise en évidence est le résultat d'un calcul erroné.

Le bilan en soufre est négatif. Or cet élément n'est présent qu'en faible quantité dans la biomasse. Pour expliquer les flux de SO_4 dans les eaux de drainage, on émet l'hypothèse d'une grande quantité de SO_4 adsorbée dans le sol. Cette hypothèse est validée par les extractions de SO_4 réalisées ; les résultats sont présentés en annexe (annexe 10, p39). La baisse de la quantité de SO_4 dans les dépôts atmosphériques engendrerait alors une désorption de SO_4 soutenant ainsi le flux de drainage. Cette désorption de SO_4 aurait lieu en profondeur, là où une diminution de $[\text{SO}_4]$ dans les solutions est observée. Le drainage de Ca et de Mg serait une conséquence de cette désorption, accompagnant SO_4 dans les eaux de drainage pour conserver l'électro-neutralité de la solution (Reuss and Johnson, 1986).

Le bilan en azote est positif sur l'ensemble de l'écosystème, l'accumulation d'azote dans le système est essentiellement due à l'immobilisation dans la biomasse (bilan = + 5,7 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$; immobilisation = 3,43 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). De plus, l'humus est un oligomull avec un turnover de la matière organique assez rapide. Toutefois, la valeur élevée du rapport C/N dans l'horizon A indique une capacité de stockage d'azote dans le sol assez forte (3200 kg/ha d'azote organique dans les 70 premiers centimètres).

Les analyses foliaires révèlent un état nutritionnel du peuplement carencé en Mg. Les nutriments azotés et potassiques sont au seuil critique et la nutrition en P est à la limite de la carence. Seule la nutrition calcique est optimale.

En termes de bilan, la nutrition actuelle en azote, en Ca et en Mg du peuplement reposerait donc en grande partie sur les apports par dépôts atmosphériques. Le prélèvement annuel dans le sol pour la croissance de la biomasse (parties ligneuses et feuilles) et le maintien des concentrations foliaires (récréation) repose essentiellement sur le recyclage des éléments dans la litière.

Calibration

Lors de la calibration de NuCM sur la période 1996-2007, la croissance implémentée était celle estimée par les comparaisons d'inventaires (croissance réelle sur la placette) en début de période de calibration. Cependant, après l'éclaircie de 1997 et la tempête de 1999, le peuplement a perdu beaucoup de tiges : l'accroissement courant réel rapporté à l'hectare a fortement diminué. L'accroissement courant sous estime vraisemblablement la croissance potentielle de la station. De plus, autour de la zone où les bougies poreuses sont installées, la densité en nombre de tiges a été peu affectée par l'éclaircie et la tempête. La croissance de la biomasse sur toute la période de calibration dans la zone autour des bougies poreuses (croissance influençant la composition chimiques des solutions du sol) est plus proche de la croissance de la biomasse avant éclaircie (estimée sur la période 1992-1997).

La table de production que nous avons utilisée surestime donc sûrement l'accroissement courant annuel du peuplement étudié induisant certainement une immobilisation trop importante de nutriments.

La calibration du modèle NuCM est très satisfaisante pour l'objectif de simulation des évolutions possibles de l'écosystème à long terme. Le modèle reproduit correctement les tendances observées dans les solutions du sol. La variabilité interannuelle n'est cependant pas bien simulée. Les phénomènes en jeu pour réaliser des simulations plus précises ne sont actuellement pas bien représentés.

Les paramètres n'ont pas été calibrés simultanément mais un à un. Nous nous sommes assurés que la valeur de chaque paramètre avait un sens physique, privilégiant la cohérence biogéochimique du modèle plutôt que la qualité de la calibration.

Les concentrations foliaires implémentées sont les moyennes calculées sur la période 1993-2001. Les éléments tels que Mg et P ont été implémentés dans une situation de carence. Ces concentrations implémentées sont considérées dans NuCM comme des concentrations objectives lorsque la croissance est maximale (croissance simulée=croissance potentielle). Dans cette situation, une augmentation des dépôts magnésiens n'entraîne pas une augmentation du prélèvement. De plus, NuCM est capable de simuler une très forte croissance dès lors que la concentration magnésienne dans la biomasse peut être établie alors qu'il faudrait en réalité un prélèvement de Mg bien plus élevé pour obtenir une telle croissance. Un autre biais est dû aux éléments qui sont en forte concentration tel que Ca. En effet, on peut imaginer que la concentration foliaire en Ca puisse diminuer assez fortement avant qu'elle n'engendre une carence. NuCM est capable de simuler ce genre d'évolution mais nous ne l'avons pas appliqué car le coefficient de réduction s'applique à tous les éléments de manière indifférenciée.

NuCM ne possède pas de module pour simuler l'immobilisation microbienne dans le sol. Une conséquence de cette lacune est l'incapacité du modèle à retenir NO_3 dans le sol. Les dépôts sous forme de NO_3 sont rapidement drainés créant ainsi une carence azotée et un départ important de cations nutritifs du profil. Pour remédier à ce problème, nous avons fait le choix de transférer le dépôt sous forme de NO_3 en NH_4 . La litière initiale et sa décomposition sont difficiles à implémenter, les paramètres n'étant pas intuitifs. Il en résulte une incertitude quant au stock d'azote simulé dans la matière organique.

L'adsorption et la désorption de SO_4 suit la même isotherme de Langmuir dans NuCM. Cependant, les isothermes d'adsorption et de désorption ne sont pas symétriques (Reuss et al., 1986). Nous avons calibré ces isothermes (une isotherme par horizon) de manière à reproduire l'évolution de $[\text{SO}_4]$ dans les solutions du sol. La dynamique de désorption simulée n'a pas pu être vérifiée.

Le prélèvement racinaire a tout d'abord été alloué aux horizons de surface puisque les connaissances actuelles montrent que la majorité du prélèvement racinaire est réalisé dans

les premiers horizons du sol. Pour réussir à reproduire l'évolution des concentrations dans les solutions du sol, il a fallu allouer une partie du prélèvement racinaire en profondeur (Ca, Mg). Cette approche est justifiée par le profil racinaire et la répartition des réserves de ces éléments dans le profil (Tableau 2). Il y a de nombreuses racines fines en profondeur et il est possible que ces racines jouent un rôle important dans l'alimentation des arbres, puisque les réserves en éléments minéraux en profondeur sont importantes.

Simulations sur le long terme

Nous avons eu recours aux tables de production (Vannière, 1984) pour simuler les scénarii de changements des dépôts atmosphériques et de sylviculture mais celles-ci n'ont pas été établies pour des peuplements vosgiens. De plus, ces tables ont été construites en 1985 et les pratiques sylvicoles ont beaucoup changées depuis. Par exemple, pour un peuplement de 60 ans, la table préconise une éclaircie prélevant 10% du volume sur pied ; l'éclaircie de 1997 a prélevé environ 25% du volume sur pied. Il y a une incertitude quant à l'adéquation entre le peuplement et la table de production.

Scénarii d'évolution des dépôts atmosphériques

Des deux scénarii testés, le scénario à dépôts constants c'est-à-dire à pollution constante est le plus favorable à la croissance forestière même s'il engendre une baisse de la croissance provoquée par une double carence, azotée et calco-magnésienne (la carence azotée est fortement induite par la forte croissance implémentée). Par comparaison, la baisse des dépôts engendre une limitation plus forte de la croissance par l'azote et secondairement par le Ca et le Mg. Ce constat paradoxal illustre l'effet « fertilisant » de la pollution atmosphérique même si elle s'accompagne d'une acidification du sol. Nous ne pouvons prédire le changement des dépôts atmosphériques dans le futur. Les scénarii ont été construits pour simuler les deux extrêmes de l'évolution la plus probable.

La croissance simulée par NuCM est rapidement limitée (Graphique 6) même dans le scénario à dépôts constants. Ce scénario permet tout de même de retrouver une croissance égale à celle proposée par la table de production. Si les dépôts diminuent, NuCM simule une carence jusqu'à la fin de vie du peuplement.

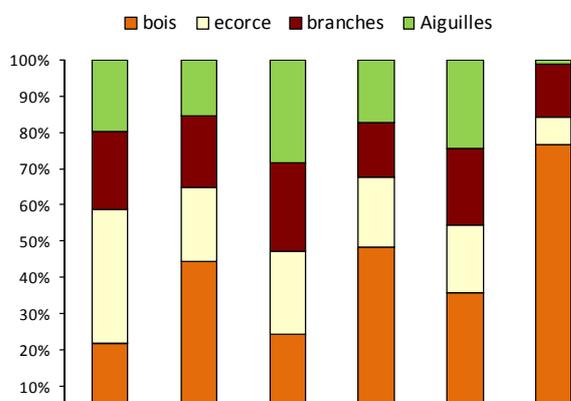
Lorsqu'un élément est en quantité insuffisante, la croissance est limitée et l'immobilisation des autres éléments, qui ne sont pas en situation de carence, diminue aussi. Dans les deux scénarii, c'est l'azote qui limite la croissance simulée. En effet, $[\text{NH}_4]$ reste stable durant la période où la croissance est limitée alors que les autres éléments continuent d'évoluer. L'azote reste limitant jusqu'en fin de période dans le scénario (B). Dans le scénario (A), lorsque la croissance diminue en raison du vieillissement du peuplement, les concentrations en azote augmentent. En effet, l'immobilisation est alors inférieure ou égale aux stocks disponibles dans le sol. Si l'excédant de nutriments n'est pas drainé, il remplit les stocks.

Dans les deux scénarii, [Mg] diminue progressivement tout au long de la période. Les « entrées » (dépôts atmosphériques et altération) dans l'écosystème sont très faibles pour cet élément et la nutrition magnésienne repose sur le recyclage interne et les apports atmosphériques. De plus, le peuplement est déjà carencé en début de simulation.

SO_4 n'atteint dans aucun des deux scénarii un état d'équilibre : la désorption simulée est très longue. Le sol continue à s'acidifier en drainant SO_4 .

Scenarii sylvicoles

Le sol de la placette SP 57 est très pauvre, NuCM simule une limitation (**Graphique 8**) de la croissance après la coupe du peuplement même si les rémanents sont laissés au sol et les dépôts atmosphériques maintenus constants. L'exportation des rémanents ne fait qu'empirer la situation : la croissance est limitée plus rapidement. Le houppier (plus petit compartiment en biomasse) contient une grande part des nutriments immobilisés dans la



Graphique 11 : Répartition en pourcentage des éléments dans les différents compartiments de la biomasse (bois du tronc, écorce du tronc, branches et aiguilles) calculée à partir de l'inventaire 2006 et des tarifs de minéralomasse construit pour le peuplement en 2007.

biomasse (**Graphique 11**). L'exportation des rémanents entraîne donc une forte exportation de minéralomasse pour une exportation de biomasse relativement faible.

La gestion des rémanents peut aggraver la situation de carence. En effet, l'exportation des rémanents équivaut à une exportation de 210 kg/ha de N, 115 kg/ha de Ca, 9 kg/ha de Mg, 20 kg/ha de P et 90 kg/ha de K. Ces quantités seront prélevées dans les stocks du sol pour la régénération du peuplement.

Carences avérées

En augmentant la concentration des éléments dans la solution du sol, nous arrivons à déterminer quels éléments sont en situation de carence dans nos simulations. Pour augmenter la croissance du peuplement, il faut ajouter de l'azote dans le système. L'azote est un élément limitant dans la simulation. L'azote ne suffit pas à lui seul pour atteindre la croissance maximale : il faut ajouter du calcium. Le calcium est aussi en situation de carence dans nos simulations. L'ajout de magnésium n'influence pas la croissance simulée. Mg ne serait donc pas un élément limitant au cours de la simulation mais il faut rappeler que Mg a été implémenté dans une situation de carence avérée (**Graphique 4**). Le peuplement simulé sur 100 ans est donc aussi carencé en Mg. La simulation permet simplement de montrer que le peuplement peut subsister avec une concentration carencée en Mg. L'évolution de [Mg] (**Graphique 9**) montre cependant que le stock de cet élément diminue progressivement. Le Mg est donc un élément critique pour la nutrition de ce peuplement.

Le module de croissance de la biomasse est trop simpliste pour réaliser des prédictions réalistes de croissance ou de dépérissement. Le module biogéochimique simulant l'évolution des stocks dans le sol est, en revanche, très robuste. La croissance implémentée à partir de la table de production est un scénario optimiste. Le modèle a été capable de simuler une croissance optimale lorsque les dépôts restent constants. La carence magnésienne n'étant pas bien prise en compte, on ne peut pas s'attendre à une telle croissance.

Le sol contient un grand stock d'azote. Ce stock, et surtout le flux de minéralisation de ce stock, est difficile à implémenter dans le modèle NuCM. Il est probable que nous sous-estimions à la fois le stock et le flux d'azote dans nos simulations. La vitesse de minéralisation varie avec la température du sol dans NuCM. Or, dans nos simulations, la température du sol n'évolue pas lors des éclaircies ou de la coupe d'exploitation. Au vu du stock d'azote dans le sol qui n'est pas pris en considération dans NuCM, il se peut que la carence d'azote détectée lors des simulations soit moins dramatique dans la réalité.

Des expériences ont montré que les peuplements qui sont soumis à des carences nutritives sont capables de mettre en œuvre des stratégies pour accélérer l'altération (Turpault et al., In press). Ces flux d'altération ne sont pas facilement mesurables puisqu'ils n'affectent

pas les concentrations dans les solutions du sol. Ces flux sont directement absorbés par les racines et ces stratégies ne sont pas prises en compte par NuCM.

Améliorations possibles du modèle NuCM

Le modèle NuCM reproduit bien les dynamiques observées sur une période de 12 ans mais comme tout modèle, il peut être amélioré. Nous avons listé les éléments qui pourraient être modifiés ou ajoutés à NuCM pour simplifier la calibration ou pour améliorer ses performances. Il faut tout de même noter que tout ajout de paramètres complexifie le modèle, ce qui peut nuire à sa robustesse. Un bon modèle est un compromis entre performance et simplicité d'utilisation, qui reproduit et prédit correctement la réalité et l'avenir.

Un défaut majeur de NuCM semble être une sous estimation de l'immobilisation microbienne. En effet, dans les solutions du sol, la concentration en NH_4 est toujours très faible. Or NuCM simule une concentration croissante de NH_4 s'il n'est pas prélevé. L'azote sous forme NO_3 n'est pas non plus retenu dans le sol. Ceci engendre une perte par drainage de NO_3 qui n'existe pas dans l'écosystème. L'ajout d'un module retenant l'azote dans le sol tout en le laissant disponible pour l'arbre permettrait de résoudre ce problème.

Le module de croissance de la biomasse pourrait être amélioré. La calibration et l'implémentation de scénarii d'évolution seraient simplifiées si la biomasse (initiale et la croissance) était implémentée selon les différents compartiments (houppier, tronc et racines). Une sortie permettant le suivi de la biomasse (en kg) et de sa composition chimique (évolution des concentrations dans les tissus) simplifierait aussi la calibration. En l'état actuel, le modèle ne permet pas de simuler facilement les éclaircies ou les coupes avec le retour de rémanents d'exploitation qu'elles induisent. Enfin, NuCM propose à l'utilisateur de répartir le prélèvement racinaire sur tout le profil. Cette répartition est fixe et si un horizon s'appauvrit au cours du temps, cela induit une carence nutritive voire un déficit de croissance dans la simulation. Un module permettant de répartir automatiquement le prélèvement racinaire de nutriments assigné à un horizon sur les autres horizons lorsque celui-ci s'appauvrit remédierait à ce problème. Et reproduirait des mécanismes de compensation probablement existant dans les écosystèmes forestiers de faible fertilité minérale.

Des sorties plus détaillées des flux hydriques à travers le profil seraient souhaitables pour une meilleure calibration hydrique et donc chimique. Le fichier stockant les données hydrologiques n'est pas simple à construire soi-même. Par ailleurs, il n'est pas possible actuellement d'implémenter les résultats simulés par un autre modèle hydrologique dans NuCM. Enfin, l'ETP (évapotranspiration potentielle) est calculée par NuCM (ETP Hartgraves). L'utilisateur ne peut implémenter ni choisir l'ETP à utiliser. Pour obtenir l'ETP désirée, NuCM propose un facteur d'amplification de l'évapotranspiration réelle mais on ne peut pas implémenter précisément une ETP préalablement calculée.

Il manque un paramètre au modèle pour permettre l'absorption foliaire.

La paramétrisation de la décomposition de la matière organique pourrait être simplifiée en diminuant les étapes simulées pour la décomposition.

Les échanges entre phase soluble et adsorbée pourraient être améliorés en offrant à l'utilisateur la possibilité d'implémenter certaines ou toutes les constantes des équations de Gapon pour les échanges cationiques. La dynamique d'adsorption/désorption du soufre serait améliorée si l'adsorption et la désorption ne suivaient pas la même isotherme de Langmuir (Reuss et al., 1986).

Intérêt de la modélisation face à l'approche bilan

La méthodologie de calcul de bilans en éléments minéraux permet de réaliser un diagnostic d'un écosystème et de constater des tendances. Cependant, un bilan n'est valable que sur la période sur laquelle il a été calculé. C'est une photographie.

La modélisation permet de diagnostiquer plus précisément un écosystème puisque celui-ci est découpé en plusieurs compartiments dont les flux et les pools sont simulés. On a une estimation de l'évolution de chacun de ces compartiments. De plus, la modélisation fournit une vision dynamique de l'écosystème : c'est une vidéo de l'écosystème sur la période de calibration.

Les phases critiques apparaissent lors de phases de croissance et d'immobilisations fortes des peuplements, au stade gaulis-perchis. L'apparition de carences à ce stade a déjà été largement signalée au cours du Programme DEFORPA (Landmann and Bonneau, 1995). La modélisation est le seul outil à notre disposition pour réaliser des prédictions d'évolutions futures des écosystèmes en construisant des scénarii d'évolutions probables des facteurs (changements globaux, qualité et quantité des dépôts atmosphériques, usage des sols et sylviculture) influençant la nutrition des peuplements.

La modélisation est enfin un bon outil pour visualiser les limites de nos connaissances de la dynamique des éléments chimiques au sein de l'écosystème.

Conclusion

L'écosystème représenté par la placette RENECOFOR SP57 reste encore aujourd'hui très sensible malgré la baisse des dépôts acidifiants au cours des 15 dernières années. Le sol a adsorbé un grand stock de sulfate durant la période de forte charge acide (années 1980) retardant l'effet acidifiant direct de ces dépôts. Le lessivage progressif de ce stock maintenant que les dépôts de soufre diminuent prolongent ainsi l'acidification du sol par drainage de SO_4 accompagné de cations nutritifs (Ca et Mg).

Il est difficile de prédire la réaction du peuplement puisque nos connaissances sont limitées sur ce sujet et le module de croissance de la biomasse du modèle NuCM est trop simpliste. En revanche, le module géochimique est robuste. L'appauvrissement du sol est très probable et on peut aussi s'attendre à des pertes de croissance ou à des dépérissements liés à cette acidification, sans pouvoir toutefois les quantifier, d'autant plus que la nutrition des peuplements est encore aujourd'hui mal comprise. C'est le cas sur la placette SP 57 : si l'alimentation en Mg est clairement déficiente, les analyses foliaires montrent une bonne nutrition calcique (Bonneau, 1995) malgré de très faibles teneurs en Ca dans les sols.

Ce genre de modèle construit dans les années 1980 et 1990 simule mieux les évolutions géochimiques des sols puisque leur acidification était la préoccupation majeure de l'époque. Aujourd'hui, les préoccupations se tournent de plus en plus vers les problématiques de déficit de croissance et d'évolution de la biodiversité en conséquence aux changements de propriétés du sol. Il faut améliorer les modèles biogéochimiques pour mieux prédire l'évolution de la croissance des peuplements et l'évolution de la biodiversité des écosystèmes (Sverdrup et al., 2009).

La base de données RENECOFOR montre l'intérêt de suivre l'évolution des écosystèmes sur le long terme. Ces longues séries temporelles permettent de mieux comprendre les dynamiques qui régissent le système mais sont surtout des bases solides pour la calibration de modèles qui pourront ensuite réaliser des prédictions plus fiables.

On voit que les écosystèmes comme SP 57 sont très lents à se restaurer malgré la diminution de l'acidité apportée. Cette lenteur illustre bien les limites des possibilités de correction de l'acidité des eaux de surface par chaulage de bassin versant. D'autant plus pour les

écosystèmes sur grès où la vitesse de transfert à travers le substrat géologique est très lente (Angéli, 2006). Une exploitation intensive de ce genre d'écosystème entrainerait une acidification encore plus prononcée du sol avec ses conséquences néfastes sur la productivité des peuplements, mais aussi sur la qualité de l'eau issue du bassin versant.

Ce stage de six mois a aussi été l'occasion pour moi de découvrir les principes de la modélisation. Les modèles biogéochimiques sont des outils pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes et pour simuler sur le long terme leur évolution. NuCM m'a aussi permis d'appréhender les différents flux (récréation, absorption foliaire, dépôts, chute de litière, prélèvement racinaire, immobilisation, échanges entre la phase soluble et adsorbé, altération) et les temps de transfert de matière entre les différents pools au sein d'un écosystème. Ces connaissances acquises au cours du stage seront utiles pour la mise en place d'un dispositif expérimental de multi-traçage isotopique, suite logique de ce stage. Le traçage isotopique du Ca et du Mg devrait permettre de mieux comprendre ces cycles complexes.

Bibliographie

- Angéli, N. (2006) Evolution de la composition chimique des ruisseaux vosgiens. Analyse rétrospective et effet d'un amendement., *UFR Sciences et Techniques de la matière et des procédés (Ecole doctorale RP2E), Docteur en géosciences de l'Université Henri Poincaré, Université Henri Poincaré, Nancy, p. 458*
- Baize, D. and M. C. Girard (1995). Référentiel pédologique. Paris, INRA, p. 332.
- Bonneau, M. (1995). Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Nancy, ENGREF, p. 367.
- Brêthes, A., E. Ulrich and (coordinateurs) (1997). RENECOFOR : Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau, Office National des Forêts, département des recherches techniques, ISBN 2-84207-112-3, p. 573.
- Cooper, D. M. (2005). Evidence of sulphur and nitrogen deposition signals at the United Kingdom Acid Waters Monitoring Network sites. *Environmental Pollution* 137, 41-54.
- Dambrine, E., A. L. Thomas, J. P. Party, A. Probst, J. P. Boudot, M. Duc, J. L. Dupouey, J. C. Gégout, F. Guérol, D. King, G. Landmann, O. Maitat, M. Nicolai, B. Pollier and A. Thimonier (1998). Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses: Distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. *Compte rendu de l'Académie d'Agriculture Française* 84(5), 75-94.
- Granier, A., N. Bréda, P. Biron and S. Villette (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116, 269-283.
- Harrison, R. B., D. W. Johnson and D. E. Todd (1989). Sulfate adsorption and desorption reversibility in a variety of forest soils. *Journal of environmental quality* 18, 419-426.
- Hedin, L. O. and G. E. Likens (1996). Atmospheric dust and acid rain. *Scientific American* 275, 88-92.
- Houillier, F., G. Pignard, F. Schmitt and P. Bertrand (1995). Medium-term evolution of forest productivity in the French mountains: the use of national forest inventory data. *Dans: Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains(Eds). Berlin, Springer-Verlag, p. 157-173.*
- Johnson, D. W., T. Sogn and S. kvindesland (2000). The Nutrient Cycling model: lessons learned. *Forest Ecology And Management* 138, 91-106.
- Kvindesland, S. (1997) The Nutrient Cycling Model (NuCM) User Manual. *Agricultural University of Norway - Department of soil and water sciences, Aas, p. 40*
- Landmann, G. and M. Bonneau (1995). Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Berlin, Springer Verlag, ISBN 3-540-58874-4, p. 461.
- Le Goaster, S. (1989) Influence de la croissance d'un peuplement sur le prélèvement en éléments minéraux - relations avec le dépérissement, *Ingénieur des Travaux des Eaux et Forêts, Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux des Eaux et Forêts, Nancy, p. 83*
- Legout, A. (2008) Cycles Biogéochimiques et bilans de fertilité minérale en hêtraies de plaine, *Docteur de l'ENGREF, AGROPARISTECH-ENGREF, Nancy, p. 281*

- Munson, R. K., S. Liu, S. A. Gherini, D. W. Johnson, K. J. Wilkinson, R. J. M. Hudson, K. S. White and K. V. Summers (1992) NuCM code version 2.0: an IBM PC code for simulating nutrient cycling in forest ecosystems final report. *Electric Power Research Institute*, p. 130
- Party, J. P. (1999) Acidification des sols et des eaux de surface des écosystèmes forestiers français : facteurs, mécanismes et tendances, *Université Louis Pasteur, Strasbourg*, p. 248
- Ponette, Q., E. Ulrich, A. Brêthes, M. Bonneau and M. Lanier (1997). RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau., Office National des Forêts, département des recherches techniques, ISBN 2-84297-100-X, p. 427.
- Ranger, J., R. Marques and M. Colin-Belgrand (1997). Nutrient dynamics during the development of a douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. *Acta Oecologica* 18(2), 73-90.
- Reuss, J. O. and D. W. Johnson (1986). Acid deposition and the acidification of soils and waters. New York, Springer-Verlag p. 119.
- SAS-Institute (2002) The SAS system for Windows 9.0, *Suny at Stony Brook, Cary, NC, USA*
- Sverdrup, H., S. Belyazid, S. Braun, D. Kurz, B. Rihm and D. Chen (2009). On the dynamic modelling of changes in plant biodiversity caused by excessive nitrogen inputs and approaches to mapping critical loads based on biodiversity aspects. *UNECE Convention on long-range transboundary air pollution - International Cooperative Programme on Modelling and Mapping (ICP M&M) of critical levels & loads and air pollution effects, risks and trends - Working group on Effects - 19th CCE Workshop, Stockholm, Suède.*
- Sverdrup, H. and Warfvinge (1988). Weathering of primary silicate minerals in the natural soil environment in relation to a chemical weathering model. *Water, air and soil pollution* 38, 387-408.
- Turpault, M. P., C. Nys and C. Calvaruso (In press). Rhizosphere impact on the dissolution of test-minerals in a forest ecosystem. *Geoderma*.
- Ulrich, B. (1983). Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: SO₂, alkali and earth alkali cations and chloride. *Dans: Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. B. Ulrich and J. Pankrath (Eds). Boston, D Reidel, p. 33-45.*
- Ulrich, E., M. Lanier and D. Combes (1998). RENECOFOR - Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous-réseau CATAENAT) - Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996, Office National des Forêts, département des recherches techniques, ISBN 2-84207-134-4, p. 135.
- Ulrich, E., M. Lanier and L. Croise (2007). Evolution de l'acidité, des concentrations de soufre et de l'azote dans les précipitations analysées dans le réseau Renécofor (période 1993 à 2005). *RDV techniques de l'ONF n° 3-8.*
- Vannière, B. (1984). Tables de production pour les forêts françaises. Nancy, ENGREF, ISBN 2-85710-016-7, p. 158.
- Vingert, X. (2007) Suivi de l'acidification d'une sapinière sur grès vosgien : évolution des concentrations des solutions du sol et bilan minéral, *Master 1 FAGE, Université Henri Poincaré - Nancy 2, Nancy, p. 24*
- Vuorenmaa, J. (2004). Long-term changes of acidifying deposition in Finland (1973-2000). *Environmental Pollution* 128, 351-362.

Annexes

Annexe 1 : Formules pour le calcul des différents flux d'élément minéraux dans l'écosystème	27
Annexe 2 : Construction des tarifs de minéralomasse pour le sapin de la placette SP 57	28
Annexe 3 : Equations dans NuCM.....	32
Annexe 4 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux sur la période de 1996 à 2007	33
Annexe 5 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (A), niveau de dépôts constants pendant 100 ans et égal au niveau actuel	34
Annexe 6 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (B), diminution des dépôts pendant 100 ans selon la tendance observée pour le soufre sur la période 1996-2007	35
Annexe 7 : Evolution des concentrations foliaires sur la période 1993-2007.....	36
Annexe 8 : Résultats de calibration du modèle NuCM sur la période 1996-2007	37
Annexe 9 : Résultats de calibration du modèle NuCM sur la période 1996-2007 (suite)	38
Annexe 10 : Expérience d'extraction du sulfate des sols de la placette SP 57 à plusieurs dates, évolution des teneurs adsorbées.....	39

Annexe 1 : Formules pour le calcul des différents flux d'élément minéraux dans l'écosystème

Bilan sur l'écosystème entier :

$$\Delta stock = (\text{Dépôts atmosphériques} + \text{altération}) - (\text{exportation biomasse} + \text{drainage})$$

Absorption/récrétion, flux net :

$$\text{Récrétion} - \text{Absorption} = \text{pluiolessivats} - \text{dépôts totaux}$$

Translocation-allocation, flux net :

$$\text{Translocation} - \text{allocation} = (\text{absorption} - \text{récrétion})_{\text{brut}} - \Delta stock$$

Où $\Delta stock$ est calculée par la différence de masse de l'élément dans les feuilles et la litière

Prélèvement racinaire :

$$\text{Prélèvement racinaire} = \Delta stock + \text{chute de litière} + (\text{récrétion} - \text{absorption})_{\text{brut}}$$

Où $\Delta stock$ est l'immobilisation, soit la différence de masse de l'élément dans la biomasse à deux dates consécutives (calculée à partir des tarifs de minéralomasse et des inventaires)

Tableau 4 : Synthèse des calculs réalisés lors du stage de master et liste des autres auteurs ayant travaillé sur la placette RENCOFOR SP 57

Calculs	Travail réalisé au cours du master	Autres auteurs
Données météo au pas de temps quotidien	Oui	M. Nicolas, X. Vingert
Bilan hydrique	Oui	V. Badeau, M. Nicolas, X. Vingert
Dépôts sec et humides	Oui	M. Nicolas, X. Vingert
Translocation	Oui	
Récrétion absorption foliaire	Oui	
Chute de litière	Oui	
Immobilisation	Oui	
Tarifs de minéralomasse	Oui	
Altération	Non	JP. Party, M. Nicolas, X. Vingert
Bilans d'éléments minéraux	Oui	M. Nicolas, X. Vingert
Sulfate adsorbé dans le sol	Oui	

Annexe 2 : Construction des tarifs de minéralomasse pour le sapin de la placette SP 57

Lors de l'éclaircie en juin 2007, des prélèvements d'échantillons et des mesures dendrométriques ont été réalisés sur des arbres abattus. Ils ont été choisis selon leur diamètre et leur représentativité dans le peuplement : 10 sapins pectinés et 3 épicéas.

Sur chaque arbre, le diamètre sur écorce a été mesuré tous les mètres le long de la grume et ainsi que le diamètre à 10 cm de l'insertion de chaque branche. Environ trois rondelles et six branches (deux par tiers de houppier : supérieur, médian et inférieur) ont été prélevées par arbre. La composition chimique a été déterminée pour les éléments (Ca, Mg, K, P et N) dans chaque compartiment végétal (bois de tronc, écorce de tronc, branche « axe principal », branche « ramifications » et aiguilles). Sur chaque rondelle, le diamètre sur et sous écorce et la densité du bois et de l'écorce ont été mesurés.

Il a fallu tout d'abord déterminer à partir des mesures dendrologiques la biomasse de chaque tronc, en distinguant le bois de l'écorce. Pour cela nous avons utilisé les mesures du diamètre sur écorce. Pour chacun de ces diamètres, nous avons calculé un diamètre sous écorce en interpolant linéairement un taux de bois (mesuré sur les rondelles) sur l'ensemble de la grume. Le volume de chaque « billon » de 1 m est calculé avec la formule du tronc de cône :

$$\text{Volume} = \frac{\pi}{12} \times (d_1^2 + d_2^2 + d_1 d_2) \times h$$

Où d_1 et d_2 sont les diamètres à l'extrémité du billon et h , la hauteur.

En estimant le volume avec d'une part le diamètre sur écorce et d'autre part le diamètre sous écorce, on obtient un volume sur écorce et sous écorce. Le volume sous écorce correspond au volume de bois et la différence entre les deux correspond au volume d'écorce.

En réalisant une interpolation linéaire de la densité du bois et de l'écorce le long de la grume, on obtient pour chaque billon une valeur de densité qui permet de convertir le volume de bois et d'écorce en biomasse « bois » et « écorce ».

Pour estimer la minéralomasse contenue dans la canopée, des équations ont été construites pour déterminer la minéralomasse contenue dans une branche en fonction de son diamètre à 10 cm de l'insertion. Ces équations sont de la forme :

$$\text{Minéralomasse} = b \times \text{diamètre}^c, \text{ où } b \text{ et } c \text{ sont deux paramètres ajustés.}$$

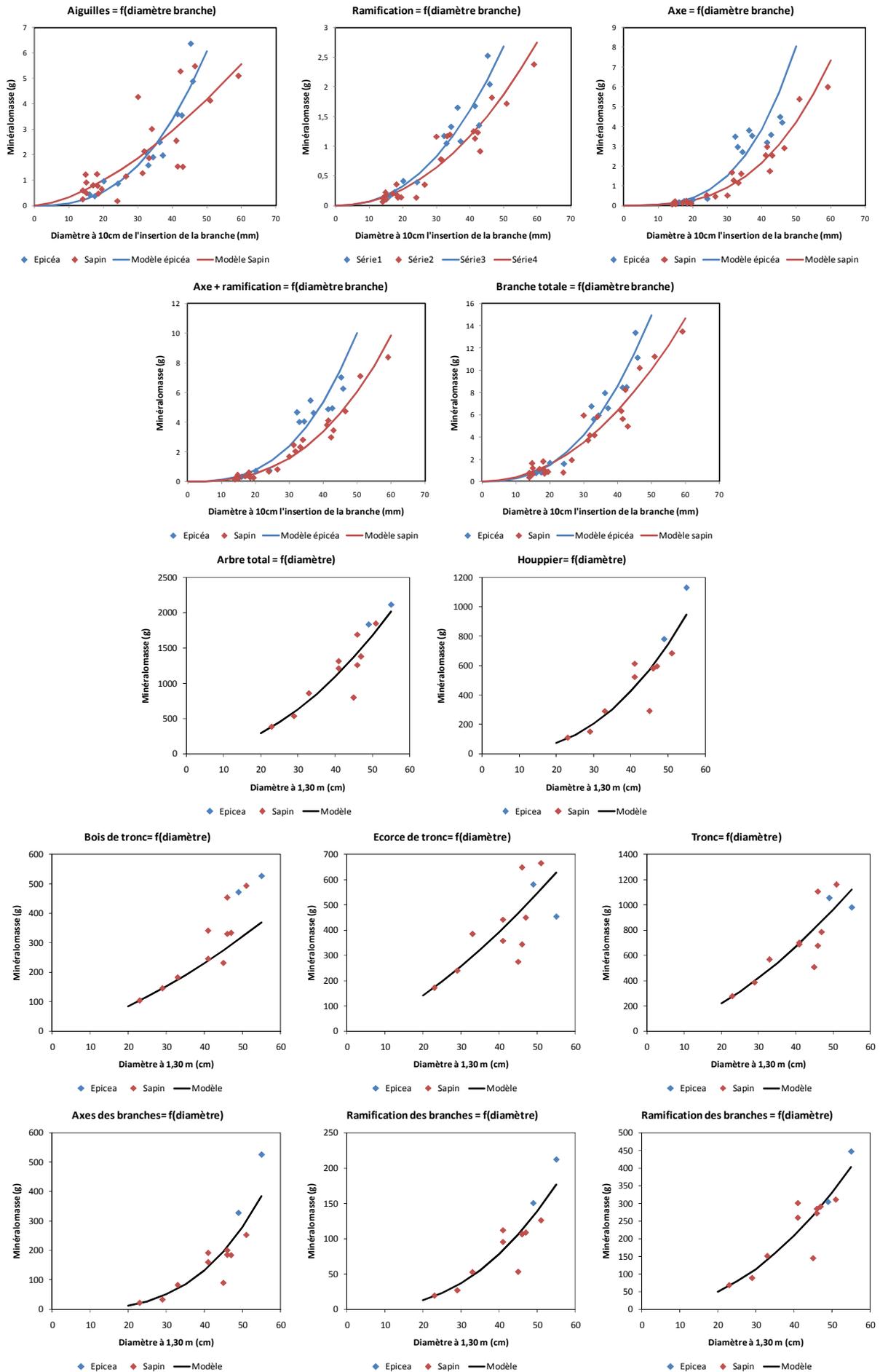
Pour surmonter le problème de l'hétéroscédasticité du nuage de points, un modèle pour la variance qui dépend du diamètre, de la forme $\varepsilon = \sigma^2 \times \text{diamètre}^{2k}$ a été inclus à l'équation.

Toute une série de tarifs a été construite pour prédire pour chaque élément, la minéralomasse contenue dans chaque compartiment de la branche (axe principal, ramification et aiguilles) en fonction de son diamètre à l'insertion. Lorsque les essences sapin et épicéa différaient, les tarifs étaient construits en séparant les essences.

L'application de ces tarifs à l'ensemble des mesures de diamètres à l'insertion pour chaque arbre donne une estimation de la minéralomasse contenue dans le houppier de chaque arbre échantillon.

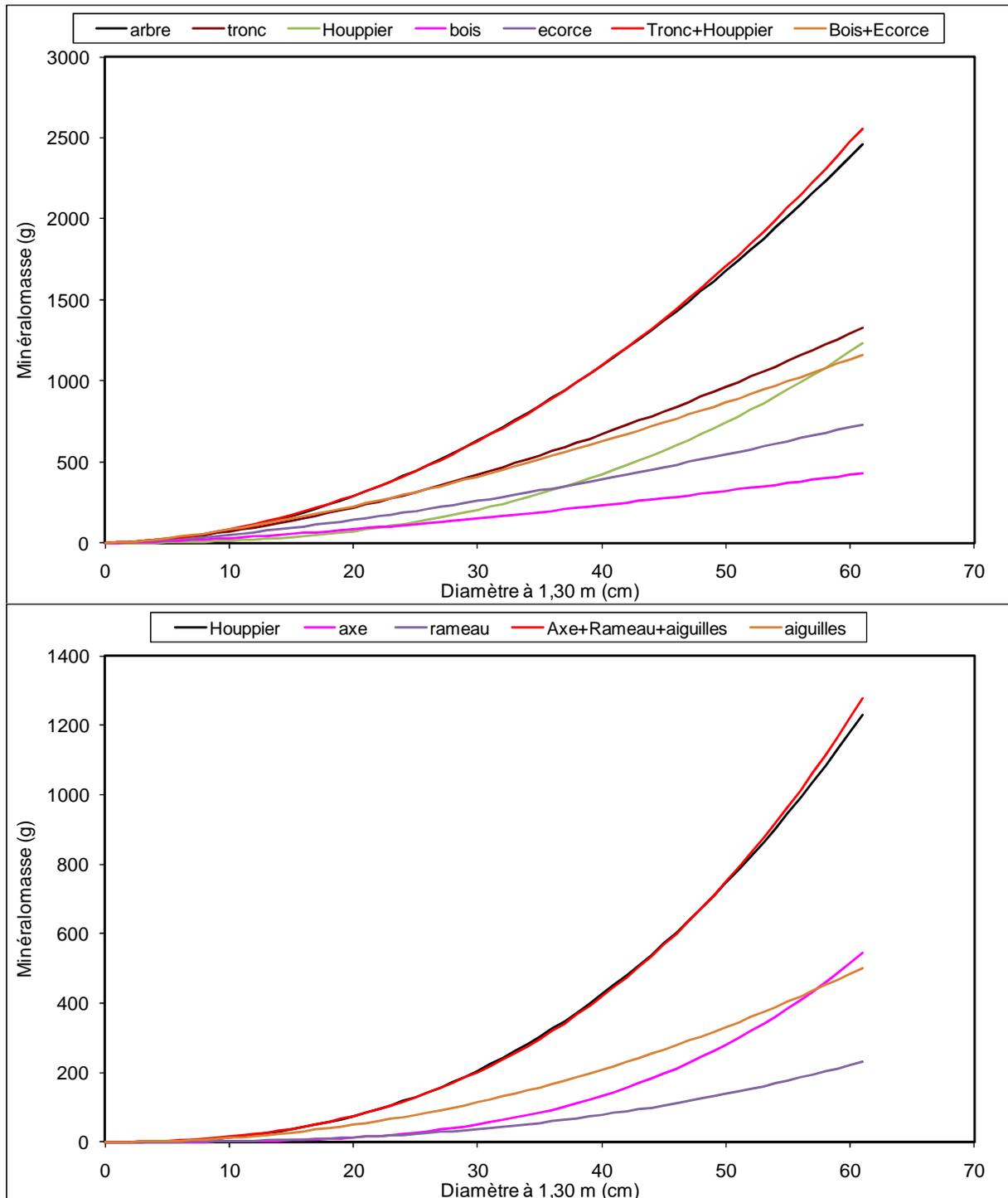
Dès lors, on connaît la minéralomasse totale de l'arbre ainsi que pour chaque compartiment. Des tarifs (de la même forme que les tarifs branches) ont été ajustés.

Graphique 12 : Construction des tarifs de minéralomasse pour la placette SP 57, exemple du calcium. Lorsque cela était possible, deux modèles spécifiques à l'essence ont été ajustés.



Additivité des modèles

Pour obtenir la minéralomasse contenue dans le houppier des arbres échantillons, nous avons appliqué un tarif prédisant la minéralomasse de la branche en fonction de son diamètre à 10 cm de l'insertion. Nous avons vérifié que les modèles construits pour chaque compartiment s'additionnaient bien. Les graphiques suivants montrent cette additivité pour l'exemple du calcium. On voit que l'on trouve approximativement le même résultat que l'on estime la minéralomasse du houppier d'un arbre à partir du tarif « minéralomasse houppier=f(diamètre) ou que l'on somme les tarifs « aiguilles », « rameaux » et « axe ». Il en est de même pour la minéralomasse de l'arbre entier et de la somme des tarifs bois, écorce et houppier.



Graphique 13 : Additivité des modèles construits pour chaque compartiment. La minéralomasse d'un compartiment regroupant plusieurs « sous-compartiments » est calculée deux fois, avec le tarif spécifique au compartiment et avec la somme des tarifs spécifiques aux « sous-compartiments » qui le compose.

Annexe 3 : Equations dans NuCM

Nitrification selon la relation de Michaelis-Menton :

$$u = \alpha v \left(\frac{[NH_4^+]}{K_s} + [NH_4^+] \right) \theta_N^{(T-20)}$$

Où u est le taux de nitrification, α le facteur de dépendance au pH, v le taux de nitrification maximal à 20°C, K_s la constante de demi-saturation et $\theta_N^{(T-20)}$ est le facteur de dépendance à la température où T est la température dans le sol en °C.

Echanges ioniques entre la solution du sol et la capacité d'échange cationique (équation de Gapon):

$$K_{gp} = \frac{[EC^{a+}](C^{b+})^{1/b}}{[EC^{b+}](C^{a+})^{1/a}}$$

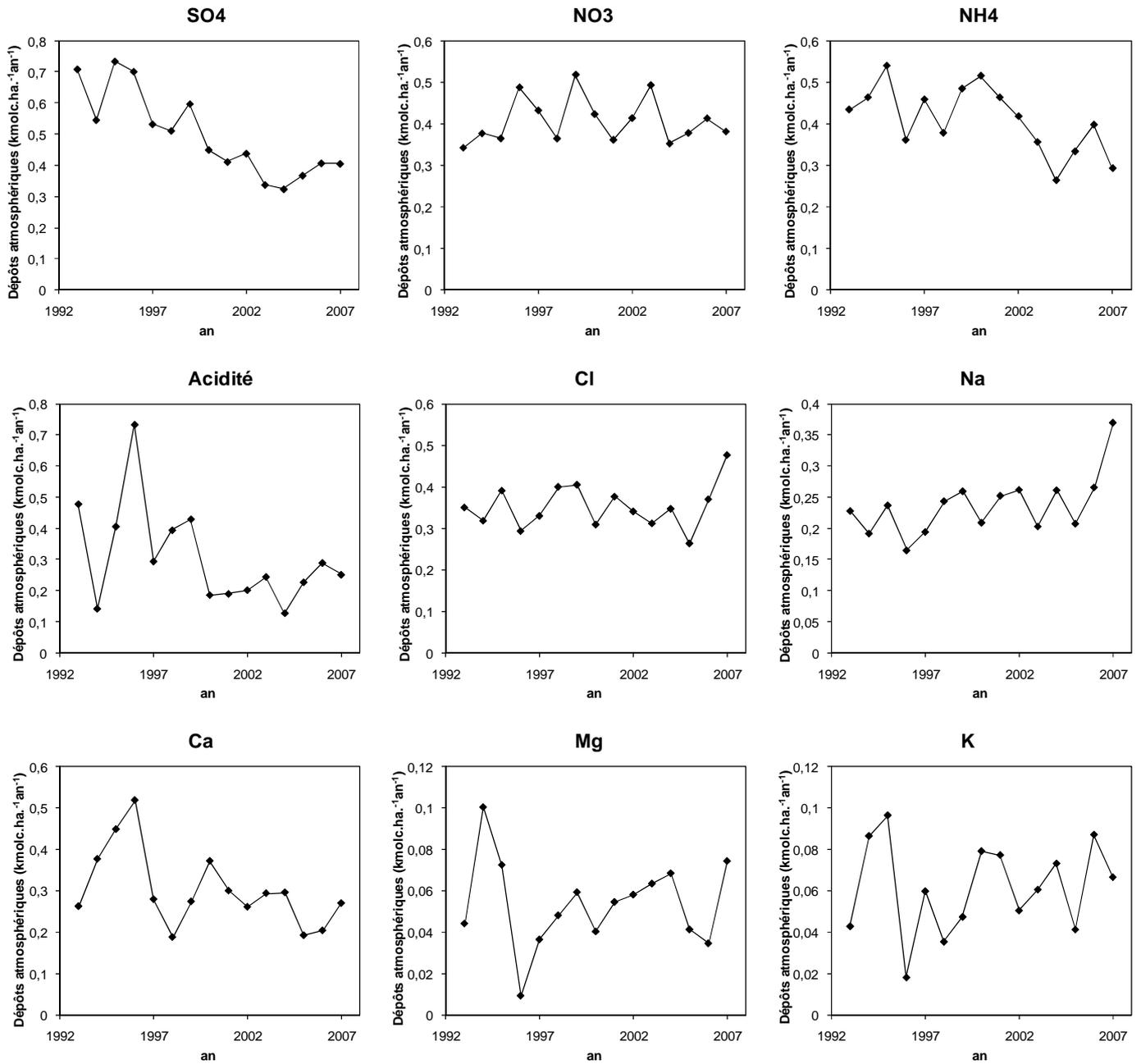
Où K_{gp} est le coefficient de sélectivité de Gapon, E la phase solide d'adsorption, C^{a+} et C^{b+} les cation de valences, respectivement, a et b , (C^{a+}) et (C^{b+}) les activités des deux cations dans la solution du sol.

Echanges ioniques entre la solution du sol et la capacité d'échange anionique (isotherme de Langmuir) :

$$Q = \frac{Q_{max} \times C}{C_{Q_{max}/2} + C}$$

Où Q est la quantité d'anions adsorbée par unité de masse de sol, Q_{max} est la quantité maximale d'anions adsorbable par unité de masse de sol, C est l'activité de l'anion dans la solution du sol et $C_{Q_{max}/2}$ est l'activité de l'anion dans la solution du sol lorsque $Q = \frac{Q_{max}}{2}$

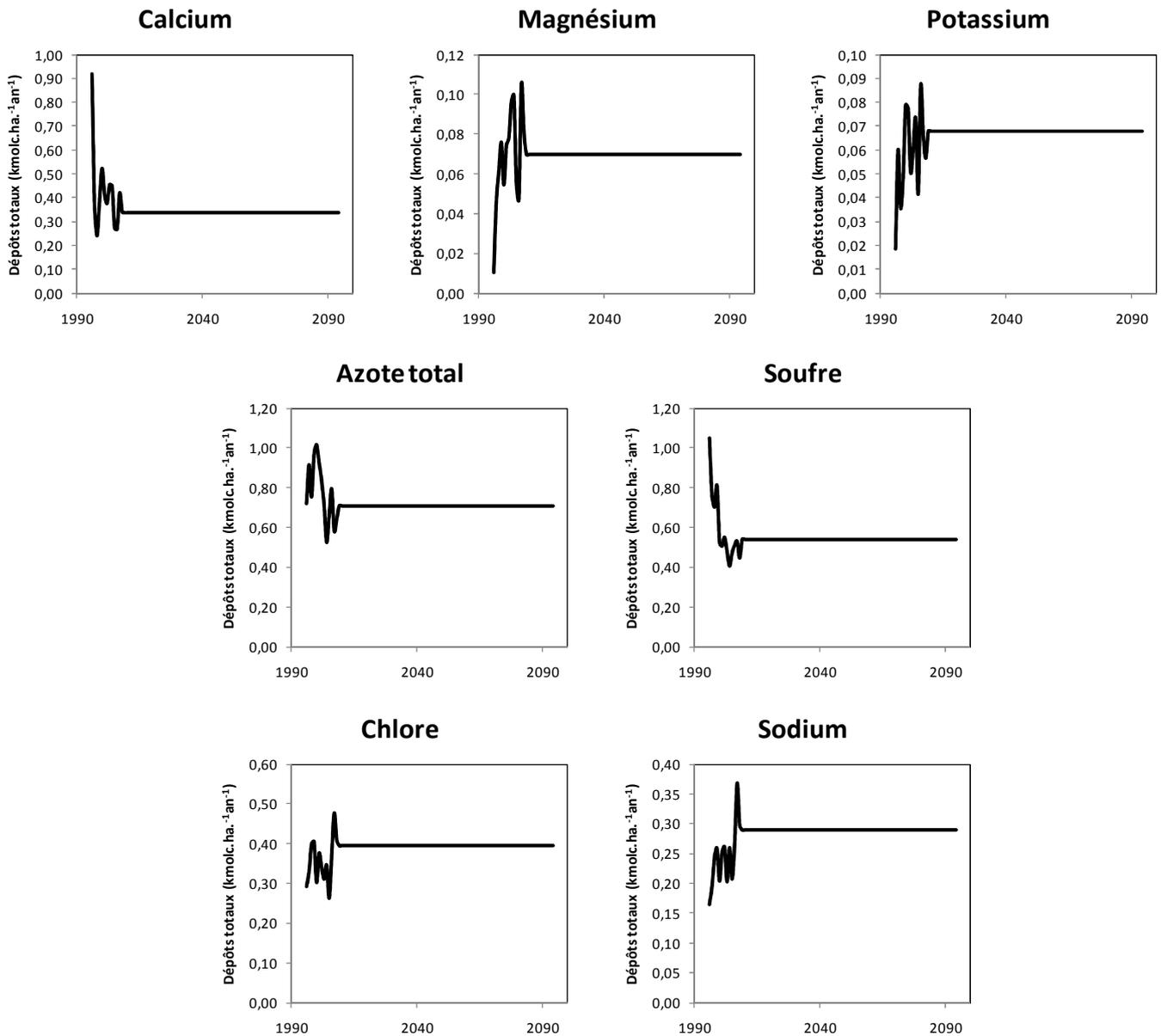
Annexe 4 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux sur la période de 1996 à 2007



Graphique 14 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux sur la période 1993-2007, les dépôts atmosphériques totaux sont exprimés en $\text{kmolc.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$

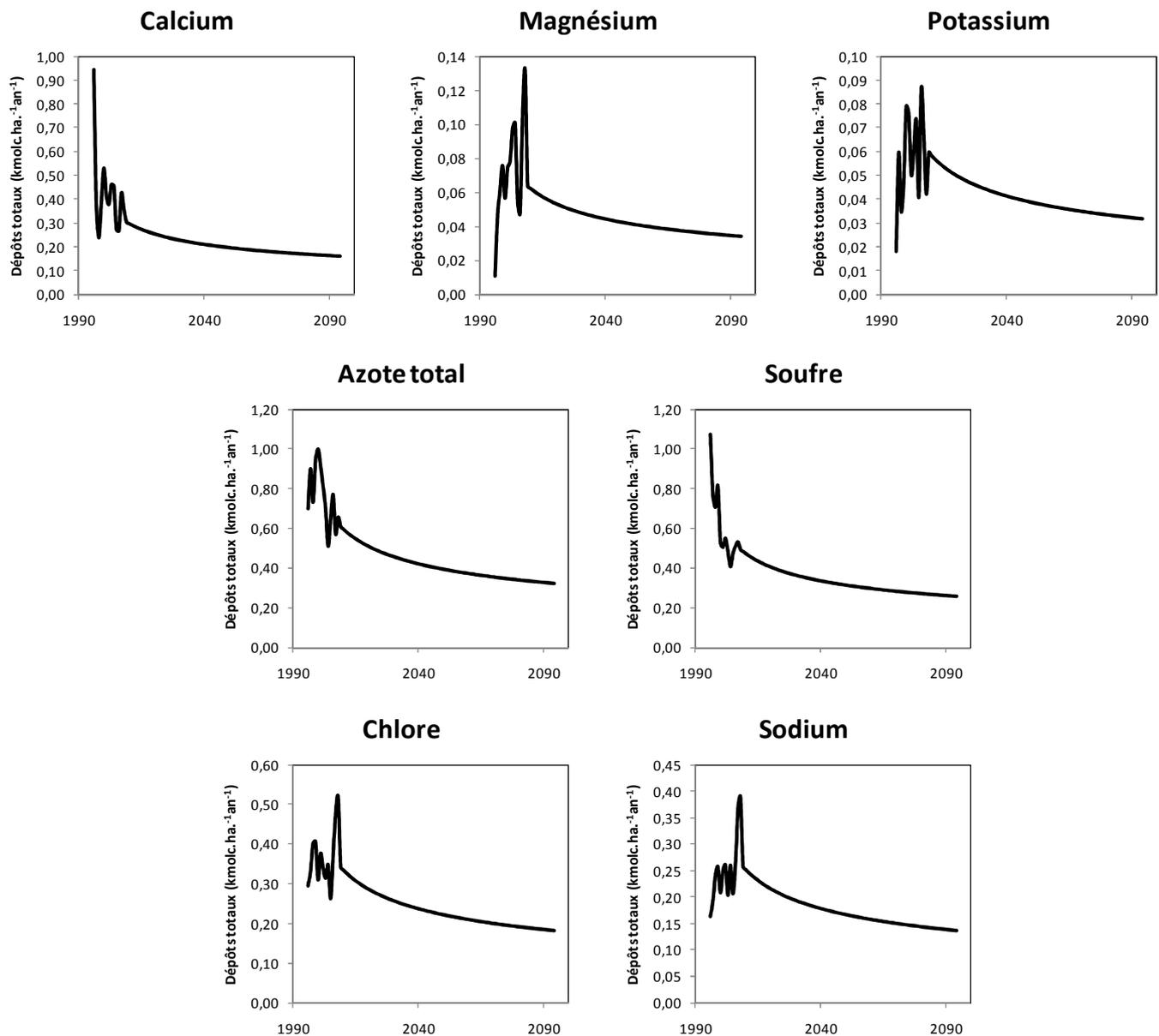
Annexe 5 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (A), niveau de dépôts constants pendant 100 ans et égal au niveau actuel

Graphique 15 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (A), niveau de dépôts constants pendant 100 ans et égal au niveau actuel, les dépôts atmosphériques totaux sont exprimés en $\text{kmolc.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$

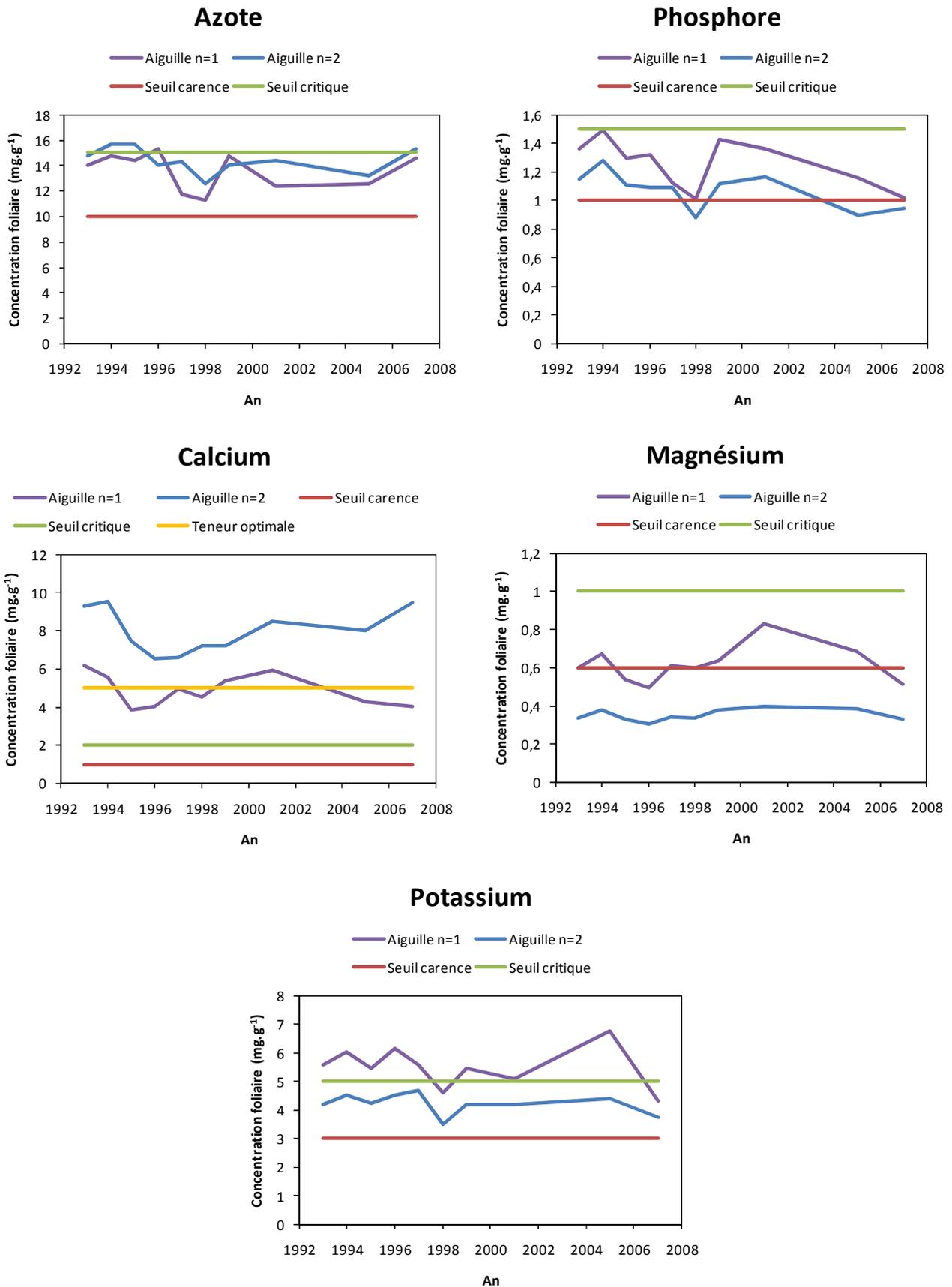


Annexe 6 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (B), diminution des dépôts pendant 100 ans selon la tendance observée pour le soufre sur la période 1996-2007

Graphique 16 : Evolution des dépôts atmosphériques totaux dans le scenario (B), diminution des dépôts pendant 100 ans selon la tendance observée pour le soufre sur la période 1996-2007, les dépôts atmosphériques totaux sont exprimés en $\text{kmolc.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$

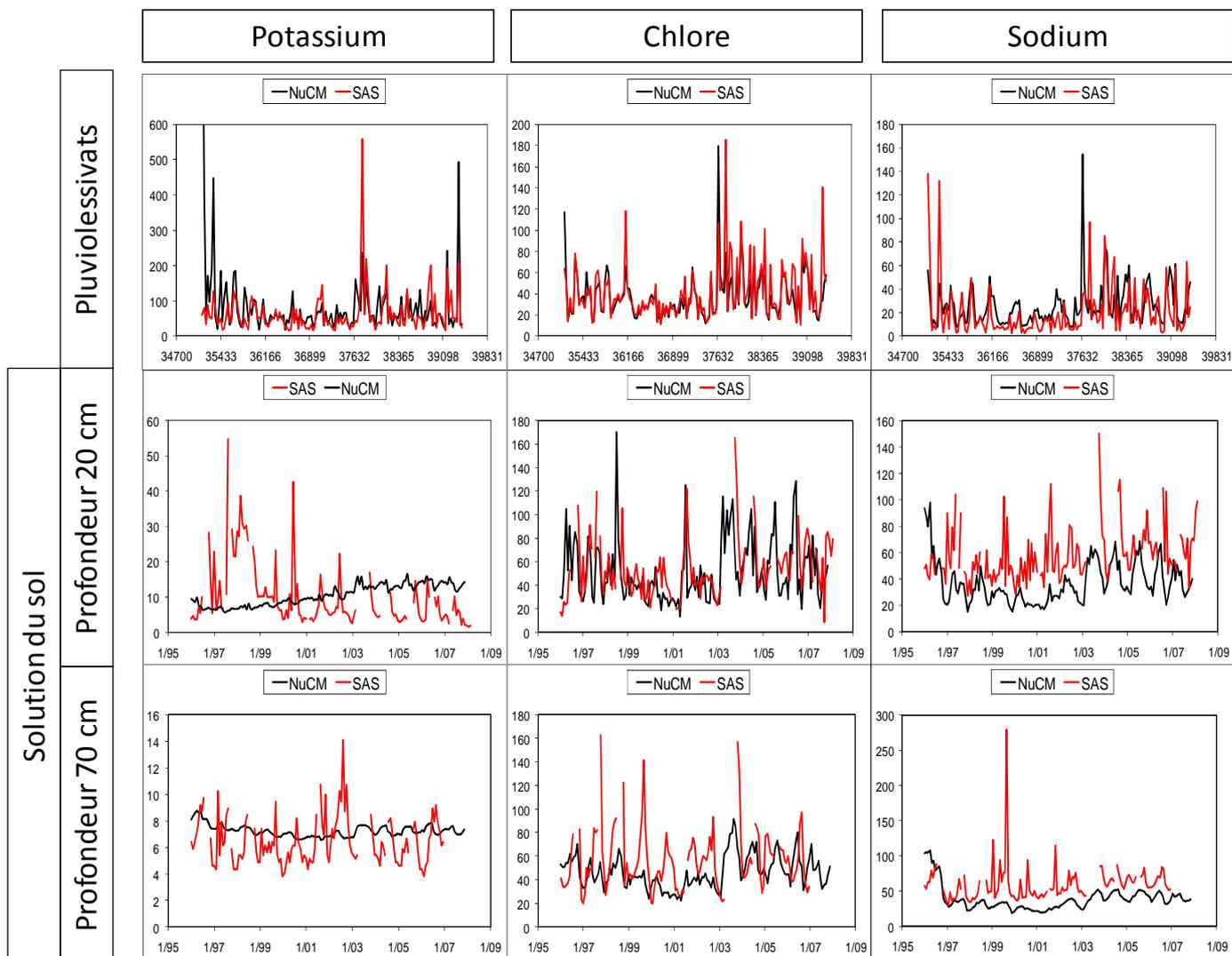


Annexe 7 : Evolution des concentrations foliaires sur la période 1993-2007



Graphique 17 : Evolution des concentrations foliaires des sapins pectinés de la placette SP 57 sur la période 1993-2007 (Données du réseau RENECOFOR). Valeurs seuil de carence, critique et optimale extraites de Bonneau 1995.

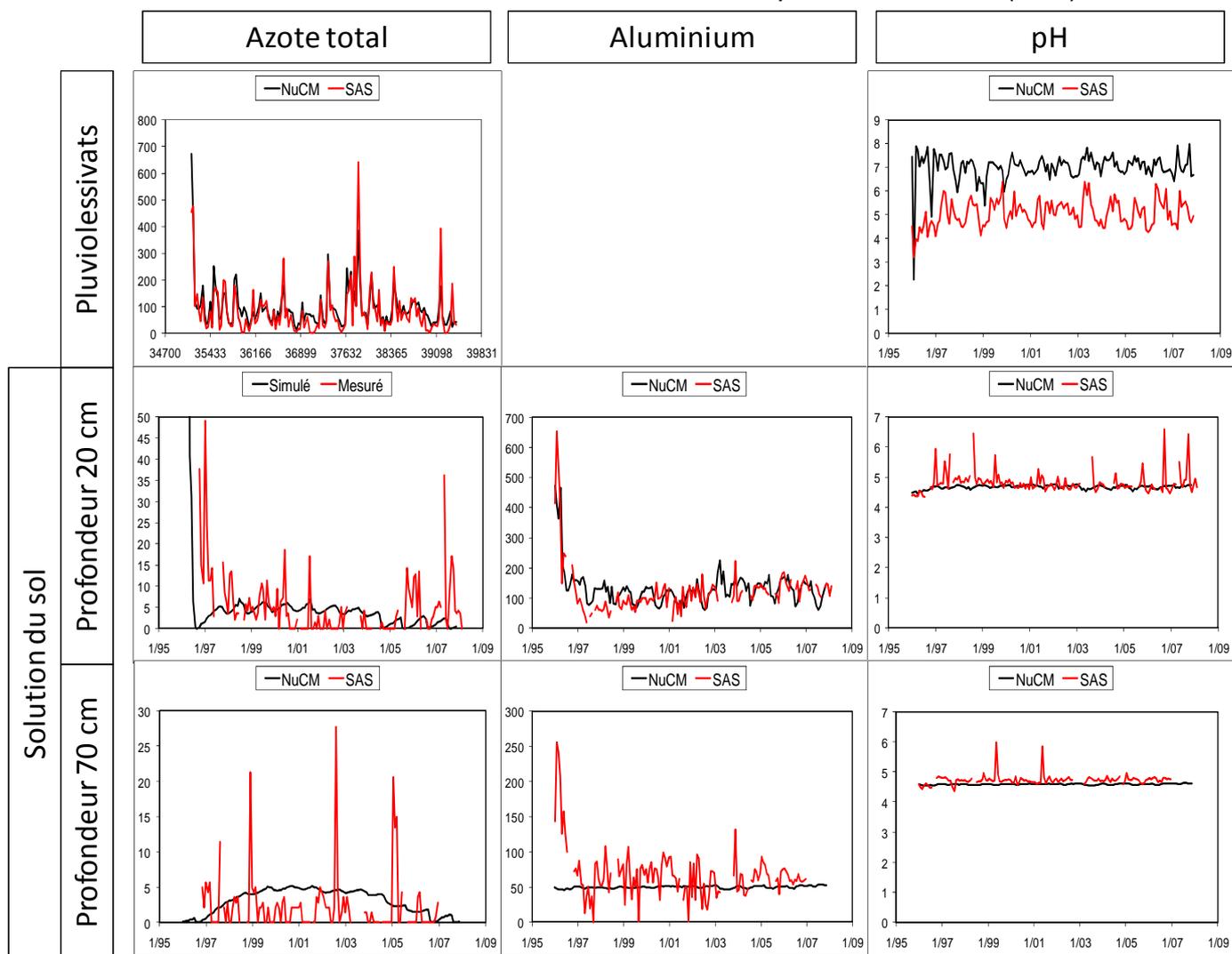
Annexe 8 : Résultats de calibration du modèle NuCM sur la période 1996-2007



	Potassium			Chlore			Sodium		
	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE
Pluiolessivats	29.29	48.79	126.28	-4.13	9.07	18.43	4.85	13.57	21.69
horizon 3	0.16	7.63	10.39	-7.04	19.02	27.66	-23.48	26.53	31.52
horizon 4	0.64	1.53	1.78	-14.18	21.24	28.53	-21.63	24.85	31.78

Tableau 6 : Erreur moyenne, absolu de l'erreur et racine carré de la somme des écarts au carré entre les concentrations simulées par NuCM et celles mesurées dans les pluiolessivats et les solutions de sol à 20cm et 70 cm de profondeur pour le potassium, le chlore et le sodium (données du réseau RENECOFOR). Les concentrations sont exprimées en µeq/l et $erreur = (valeur\ simulée) - (valeur\ mesurée)$

Annexe 9 : Résultats de calibration du modèle NuCM sur la période 1996-2007 (suite)



	Azote total			Aluminium			pH		
	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE	Erreur moyenne	Absolu de l'erreur	RMSE
Pluiolessivats	6.62	39.28	60.99				1.50	1.52	1.72
horizon 3	-28.33	30.68	115.97	-13.61	62.27	78.67	-0.14	0.20	0.33
horizon 4	-10.58	14.32	51.23	97.51	99.02	102.58	-0.14	0.15	0.22

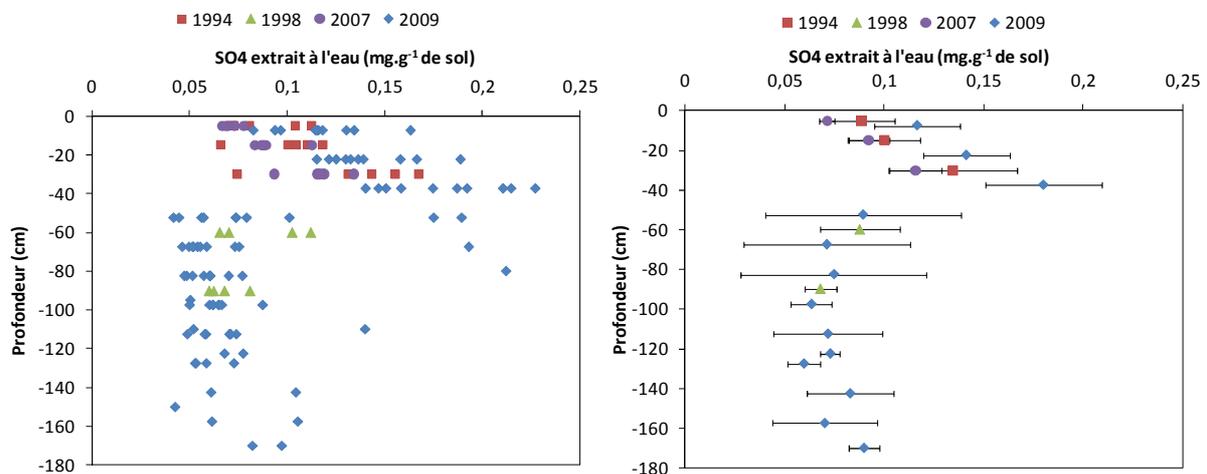
Tableau 7 : Erreur moyenne, absolu de l'erreur et racine carré de la somme des écarts au carré entre les concentrations simulées par NuCM et celles mesurées dans les pluiolessivats et les solutions de sol à 20cm et 70 cm de profondeur pour l'azote total, l'aluminium et le pH (données du réseau RENECOFOR). Les concentrations sont exprimées en µeq/l et $erreur = (valeur\ simulée) - (valeur\ mesurée)$

Annexe 10 : Expérience d'extraction du sulfate des sols de la placette SP 57 à plusieurs dates, évolution des teneurs adsorbées

Protocole Extraction SO4

En avril 2009, des prélèvements de sol ont été effectués sur la placette SP 57 sur l'ensemble du profil. Des échantillons de sol prélevés en 1994, 1998 et 2007 ont été récupérés de la pédothèque RENECOFOR. Une extraction séquentielle des sulfates dans ces échantillons a été réalisée avec de l'eau dans un premier temps puis avec une solution de NaH_2PO_4 à 1000 ppm de P dans un second temps. Le protocole suit les extractions réalisées sur une grande diversité de sols par Harrison et al (Harrison et al., 1989) pour pouvoir comparer plus aisément les résultats de notre site à d'autres. Les extraits de sols ont ensuite été dosés par spectrométrie d'absorption moléculaire (colorimètre à macro flux SKALAR).

Résultats



Graphique 20 : Résultats des extractions réalisées à l'eau sur l'ensemble du profil et selon les différentes années de prélèvement (1994, 1998, 2007 et 2009).

Des interférences lors du dosage des sulfates extraits avec la solution de PO_4 rendent ininterprétables les résultats obtenus. En revanche, les résultats de l'extraction à l'eau sont interprétables (Graphique 20).

Le sol contient beaucoup de soufre adsorbé. La moyenne du soufre adsorbé sur l'ensemble du profil (0,0979 mg/g de sol) est bien supérieure aux valeurs trouvées dans la littérature (0,0833 mg/g de sol) (Harrison et al., 1989). Il y a un gradient d'adsorption dans le profil avec des valeurs plus élevées dans les horizons superficiels.

En comparant les différentes années de prélèvement, on constate de légères différences dans les quantités de soufre adsorbé. Ainsi, entre le prélèvement en 1994 et celui en 2007, la quantité de soufre adsorbé dans les horizons superficiels du sol diminue. En revanche, en 2009, ces mêmes horizons contiennent plus de sulfates qu'en 1994 et 2007.

Dans les horizons profonds, on observe aussi une baisse des sulfates adsorbés entre 1998 et 2009 mais cette diminution est moins marquée.

Discussion

Les extractions réalisées avec la solution de NaH_2PO_4 n'ont pu être dosées correctement à cause d'interférences lors du dosage par spectrométrie à adsorption moléculaire. Il est possible que du sulfate se soit accumulé dans l'appareil de mesure ou bien qu'une autre espèce chimique (PO_4) ait réagi avec le baryum.

En revanche, les extractions à l'eau réalisées sur l'ensemble du profil permettent de caractériser l'état actuel du sol et d'observer des dynamiques au cours du temps. Le profil de sol présente un gradient d'adsorption : les horizons superficiels adsorbent plus de sulfate que les horizons profonds. Ceci contredit notre hypothèse de départ. Nous pensions trouver plus de sulfate en profondeur dû à la plus grande quantité d'oxydes de fer.

On observe tout de même une légère diminution des quantités de sulfate adsorbé sur la période 1994-2009. Cependant, on observe aussi une très nette augmentation dans les horizons superficiels entre 2007 et 2009. Cette augmentation est trop importante pour être expliquée par le retour au sol de rémanents après l'éclaircie de 2007. Nous ne disposons pas des données de dépôts atmosphériques après 2007 et nous n'avons pu trouver d'explication à cette brusque augmentation.

Le sol contient une grande quantité de sulfate adsorbé, on peut penser que l'état d'équilibre ne sera pas obtenu rapidement.

Résumé

Le modèle biogéochimique NuCM (Nutrient Cycling Model) a été calibré sur la placette RENECOFOR SP 57 dans le massif Vosgien. Ce site a été suivi depuis 1992 et les bilans d'éléments minéraux montrent une désorption de sulfate dans les sols. Le sulfate est drainé entraînant avec lui des cations nutritifs : majoritairement du calcium et du magnésium. Il en résulte une acidification continue malgré la baisse des dépôts atmosphériques soufrés.

Le modèle a été capable de reproduire les évolutions dans les solutions de sol sur les 12 ans de la période de calibration sans toutefois reproduire la variabilité interannuelle.

Deux scénarii d'évolution future des dépôts atmosphériques et deux scénarii de mise en valeur sylvicole ont été simulés : (A) prolongation du niveau de dépôts atmosphériques actuel, (B) baisse des dépôts selon la tendance observée pour le soufre sur la période 1996-2007, (C) sylviculture traditionnelle à la révolution de 120 ans, (D) sylviculture dynamique et exploitation pour le bois énergie.

La baisse des dépôts engendre une diminution de la croissance du peuplement due à une carence calco-magnésienne. Ce constat paradoxal illustre l'effet « fertilisateur » de la pollution atmosphérique même si elle s'accompagne d'une acidification du sol. Parallèlement, la gestion des rémanents a un impact fort sur la régénération et la croissance du nouveau peuplement. L'exportation de cette biomasse réduit la fertilité chimique des sols.

L'écosystème représenté par la placette SP 57 a été très appauvri par la période de forte charge acide. Le peuplement encourt un fort risque de carence calcique dans les prochaines décennies et est déjà carencé en magnésium. Ce peuplement ne peut être géré durablement dans la politique forestière actuelle sans apport d'amendement.

Mots clés : Modélisation, croissance forestière, pollution atmosphérique, sylviculture, changements globaux

Summary:

The biogeochemical model NuCM (Nutrient cycling model) was applied to a forested ecosystem in the Vosges Mountains, the RENECOFOR SP 57 site. This site has been monitored since 1992 and mineral budgets show that a high quantity of sulphur is being desorbed from the soil. Sulphur deposition is reduced but Sulphate is still being then drained further acidifying the soil by draining nutrient cations: mainly calcium and magnesium.

The model successfully reproduced the trends in the soil solution concentrations over the 12 year period of calibration but was unable to recreate seasonal variability.

Two atmospheric deposition evolution scenarios and two silvicultural scenarios were simulated: (A) constant atmospheric deposition equal to present deposition, (B) atmospheric deposition reduction according to the observed trend during the 1996-2007 period, (C) traditional silviculture (stand harvested at 120 years) and (D) intensif silviculture (biomass export for bio-fuel).

The reduction of atmospheric deposition causes a growth reduction due to a calcic and magnesium deficiency. This paradox illustrates the "fertilizing" effect of atmospheric pollution even if it simultaneously causes soil acidification. In addition, slash export management influences greatly the regeneration and growth of the following stand. Excessive biomass exportation reduces soil chemical fertility.

The ecosystem represented by the SP 57 site has been impoverished other the years during the high acid load period. There is a very important calcic deficiency risk in the next decades and the stand suffers already of magnesium deficiency. This stand cannot be sustainably managed with present forest policies without fertilization.

Key words: modeling, forest growth, atmospheric pollution, silviculture, global change