



HAL
open science

Le réseau Amendement pour le suivi sur le long terme de la restauration ou du maintien de la fertilité en forêt

Arnaud Legout, Claude Nys, Serge Didier, Claudine Richter

► To cite this version:

Arnaud Legout, Claude Nys, Serge Didier, Claudine Richter. Le réseau Amendement pour le suivi sur le long terme de la restauration ou du maintien de la fertilité en forêt. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2016, 51-52, pp.19-28. hal-04222683

HAL Id: hal-04222683

<https://hal.inrae.fr/hal-04222683>

Submitted on 12 Jul 2024

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.

Le réseau Amendement pour le suivi sur le long terme de la restauration ou du maintien de la fertilité en forêt

Veiller à la fertilité des sols est une préoccupation d'importance au regard des services attendus de la forêt, pour la fourniture de bois matériau et bois énergie ou le stockage de carbone mais aussi comme réservoir et support de biodiversité. À l'échelle nationale, différents réseaux de monitoring aident à suivre l'évolution temporelle des sols et leur fertilité. Pour sa part, l'INRA a conduit depuis plus de 50 ans des expérimentations de fertilisation forestière (amendement minéral, engrais...) pour restaurer des sols dégradés ou soutenir la production; il ranime ses anciens essais, désormais constitués en réseau, pour mieux faire face aux enjeux.

Les forêts tempérées françaises sont pour l'essentiel cantonnées sur les sols les moins propices à l'agriculture : sols « ingrats », hydromorphes, caillouteux, pentus... Ce sont bien souvent des sols acides, pauvres chimiquement, vulnérables à la dégradation de leur faible fertilité et ayant parfois subi des pratiques appauvrissantes par le passé (soutrage, surexploitation pour alimenter des manufactures...). Le maintien voire l'amélioration de la fertilité des sols forestiers n'est pas une préoccupation récente pour les gestionnaires.

Depuis les années 70, les crises énergétiques (qui remettent sur le devant de la scène l'intérêt du bois), les épisodes de pluies acides et le contexte actuel de changements globaux (climat, pollution, demande accrue en bois énergie et bois matériau) maintiennent une pression soutenue sur les peuplements et les sols forestiers. Exposés à des stress multiples, les écosystèmes forestiers peuvent alors connaître des dysfonctionnements susceptibles d'aboutir dans une étape ultime à leur dépérissement. Pour mieux comprendre et anticiper l'évolution des forêts françaises, il est important de pouvoir s'appuyer sur des réseaux de mesures (sols, peuplements...) sur le moyen – voire long – terme : dispositifs de monitoring, à l'exemple des réseaux RENECOFOR ou RMQS¹, mais aussi ensemble d'essais expérimentaux plus ou moins anciens permettant de tester des itinéraires de gestion des sols forestiers afin d'adapter les forêts aux contraintes et/ou d'atténuer les stress.

L'objectif de cet article est de présenter le réseau Amendement constitué par l'unité BEF (Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers) de l'INRA Nancy, sa genèse et ses évolutions, les avancées auxquelles les dispositifs constitutifs ont contribué ainsi que les potentialités d'un tel réseau pour des recherches en cours et futures.

Quelques définitions

Les **matières fertilisantes** comprennent les engrais, les amendements et, d'une manière générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux, ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

La pratique de l'**amendement minéral** en forêt consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium et/ou magnésium broyé (CaCO_3 - MgCO_3). L'amendement a pour objectif premier une amélioration sur le long terme des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol en vue de favoriser son fonctionnement et plus généralement celui de l'écosystème. Cette pratique vise donc au maintien ou à la restauration de la fertilité minérale d'un écosystème forestier, l'amendement étant aujourd'hui majoritairement conseillé lorsqu'une déficience de la nutrition de peuplements est avérée (peuplements carencés et/ou dépérissants) ou pour contrecarrer les effets délétères d'une acidification marquée. L'apport de carbonate de calcium et/ou magnésium est parfois complété d'un apport de phosphore et/ou de potassium afin d'éviter des déséquilibres nutritionnels.

Il ne faut pas confondre l'amendement avec l'**apport d'engrais** (N, P, K), qui s'inscrit dans une échelle de temps plus courte et dont l'objectif est de maintenir ou d'accroître le pool d'azote (N), phosphore (P) et potassium (K) disponible pour la plante, afin d'augmenter la production végétale.

¹ Réseau de mesure de la qualité des sols (<http://acklins.orleans.inra.fr/programme/rmqs/rmqs.php>)

Historique des essais expérimentaux

Les premières expérimentations françaises de fertilisation forestière datent de la fin des années 60, sous l'impulsion de M. Bonneau (directeur de la Station de Recherche sur les Sols Forestiers et la Fertilisation et enseignant à l'ENGREF). La recherche forestière était alors imprégnée du modèle agronomique de l'époque, qui s'appuyait notamment sur la génétique et l'amélioration des pratiques et techniques culturales (apport d'engrais, lutte contre les pathogènes...) pour accroître la production.

M. Bonneau a consacré une partie de sa carrière à la compréhension de la relation « station – production » (par enquête puis expérimentation), l'objectif étant de définir une « station » optimale/idéale par essence. La connaissance de la station permet ensuite de bien choisir l'essence, en choisissant par exemple des essences frugales pour valoriser les sols pauvres chimiquement. M. Bonneau considéra qu'il était aussi possible d'adapter le sol aux exigences d'une essence et un large pan de ses recherches a été consacré à la fertilisation en forêt. Des essais d'apport d'engrais (N, P, K) avaient été mis en place dans des pays frontaliers (Allemagne, Belgique) dès le début du 20^e siècle et cette pratique permettait des gains de production importants. La France était dépourvue d'essais rigoureux en matière de fertilisation et M. Bonneau installa à partir des années 1960 un ensemble de dispositifs, essentiellement en plantation, pour en étudier les effets.

Au cours des années 1970 des dépérissements de résineux sont constatés en Forêt-Noire, en Bavière, au sud de la Pologne, en Allemagne de l'Est et en Tchécoslovaquie de l'époque. Au début des années 1980, des symptômes de dépérissement des forêts sont observés dans plusieurs régions françaises (Vosges puis Ardennes...). Le programme

de recherche DEFORPA (1983-1995, Landmann et Bonneau, 1995) s'est intéressé à l'analyse des causes et aux recommandations pour gérer la crise et prévenir de nouveaux dommages. Les investigations ont notamment porté sur les relations entre pluies acides, dépérissement et fertilité des sols. Les essais de première génération (mentionnés ci-dessus) ont été réexaminés au regard de cette problématique, et de nouveaux essais ont été mis en place. Orientés sur l'amendement calco-magnésien (apport de Ca et Mg), ces nouveaux essais ont utilement complété les anciens, qui portaient plutôt sur les fertilisants N, P et K.

Constitution du réseau Amendement

Ces dispositifs ont connu depuis leur mise en place des périodes d'activité mais aussi de dormance, parfois de plusieurs années. Cependant ces « pauses » ne doivent pas les faire tomber dans l'oubli et leur suivi doit perdurer pour permettre d'avancer dans la compréhension du fonctionnement-dysfonctionnement des écosystèmes forestiers dans le contexte actuel de changements globaux (changements climatiques, besoin croissant en bois énergie...). Pour pérenniser et consolider ces dispositifs, l'INRA a décidé de les regrouper sous forme d'un réseau (Amendement), dont les principales caractéristiques sont décrites dans la suite de l'article.

État des lieux préalable

Un travail d'inventaire et de visite des sites expérimentaux a été réalisé de 2009 à 2013 par les équipes BEF (Biogéochimie des Écosystèmes forestiers) et UEFL (Unité Expérimentale Forestière Lorraine) de l'INRA Nancy. Certains n'avaient pas été suivis et/ou entretenus depuis plusieurs années et il était donc nécessaire de faire un état des lieux pour décider des dispositifs à pérenniser sur le long terme. Suite aux visites de terrain, les dispositifs ont été classés en

trois catégories : I) en état correct (24 dispositifs) II) en mauvais état (passage d'engins...) et/ou présentant des contraintes scientifiques et/ou technique fortes (parcelles unitaires de trop petite surface...) (8 dispositifs), et III) détruits ou très perturbés (aléas climatiques...) (8 dispositifs). À ce jour, plus de 25 dispositifs restent encore à visiter et évaluer.

Les sites inventoriés, leurs principales caractéristiques et leur état sont présentés dans les tableaux 1 et 2 (pages 22-23). Ce réseau regroupe différentes essences (chêne, hêtre, épicéa, sapin, douglas, pin), dont plusieurs peuvent être représentées sur un même dispositif. L'âge des peuplements à la mise en place des essais est très variable, tout comme les produits apportés (engrais, carbonates Ca ou Ca-Mg, gypse, scories...) et les doses administrées (de quelques dizaines de kg à plusieurs tonnes par hectare). L'emprise de chaque dispositif varie de 1 à 6 hectares, en fonction des modalités appliquées, du nombre de blocs, et de la taille des parcelles unitaires (de 0,01 à 1 ha); un exemple de plan d'expérimentation est présenté dans la figure 1. Les dispositifs en état correct ont été rénovés sur la période 2010-2013 (photo 1) : localisation précise des différentes placettes expérimentales, re-matérialisation à la peinture des limites des placeaux ainsi que des numéros d'arbre, inventaires en plein. Ils feront désormais l'objet d'un suivi régulier sur le long terme : passages périodiques sur site pour la maintenance (peinture...) et, selon les projets de recherche et *a minima* tous les 10 ans, pour suivre l'évolution des sols, des humus, ainsi que la croissance et l'état nutritionnel des peuplements. Pour les autres dispositifs, il sera toujours possible de travailler sur les échantillons et sur les données historiques, et de nouvelles données pourront éventuellement être acquises de façon ponctuelle dans le cadre d'un projet spécifique (en considérant bien entendu préalablement l'état du dispositif).



INRA - BEF

1 – Allure des placettes après remise en état (La Croix Scaille, 2009)

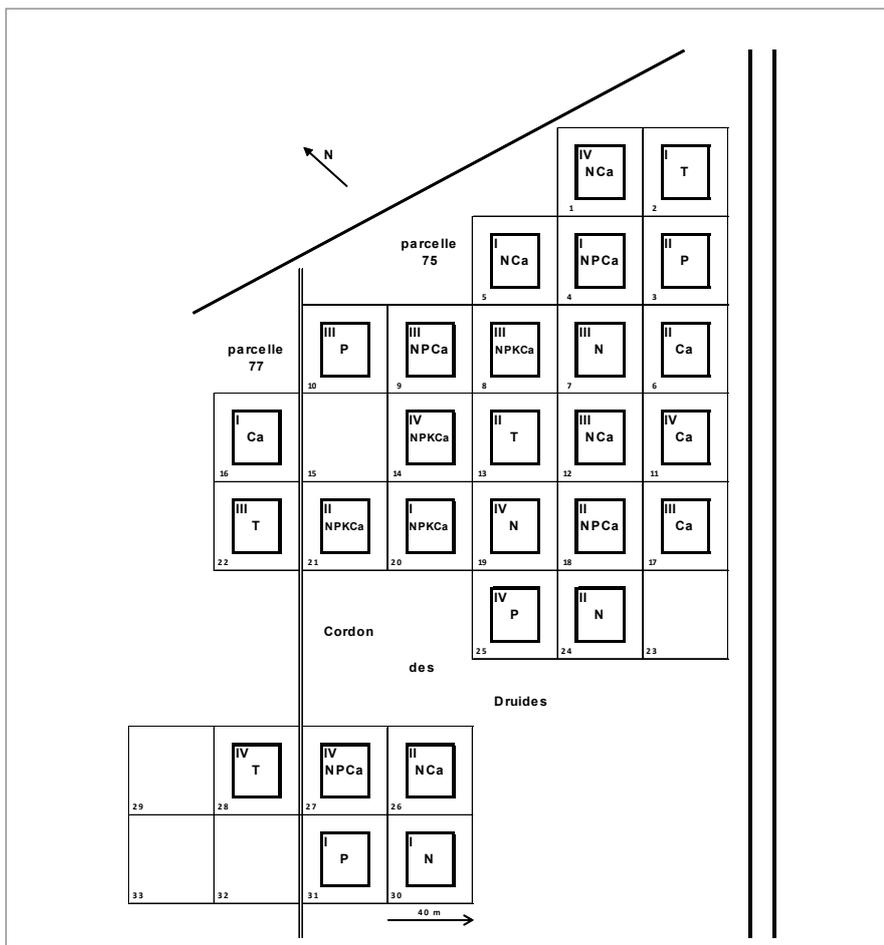


Fig. 1 : exemple du dispositif de Fougères, installé en 1972 pour tester l'effet de l'apport simple ou combiné de N, P, K et Ca sur la croissance d'une hêtraie

Ce dispositif comprend 4 blocs (I, II, III, IV) et 7 traitements (T : Témoin, N, P, Ca, NCa, NPCa, NPKCa). L'emprise globale est d'environ 5 ha. La gestion sylvicole est la même que pour les parcelles environnantes.

La gestion scientifique et technique de ce réseau est aujourd'hui assurée par l'unité BEF (avec l'UEFL jusqu'à sa fermeture en 2015), en collaboration avec les propriétaires des terrains ou leurs représentants (ONF, communes, propriétaires privés).

Les mesures réalisées, les bases de données et la conservation des échantillons anciens

À leur installation (avant l'apport des produits), les dispositifs ont généralement fait l'objet d'un « état initial » en bonne et due forme. Ils ont ensuite été mesurés de façon plus ou moins régulière selon les moyens techniques, humains et financiers disponibles pour réaliser les campagnes de prélèvements et les analyses physico-chimiques (sol, humus, peuplement). La fréquence des mesures varie donc bien souvent de l'un à l'autre et en fonction des paramètres suivis (liés aux objectifs initiaux et aux projets scientifiques successifs adossés aux dispositifs).

Différents compartiments de l'écosystème sont concernés (sol, humus, arbre et notamment les feuilles/aiguilles, strate herbacée...), l'objectif principal étant d'étudier l'effet des produits apportés sur ces compartiments, et de façon plus globale sur l'écosystème. Cet effet peut être déduit des comparaisons entre les placettes ayant reçu le produit fertilisant et des placettes témoins (écosystème similaire en tout point, mais sans apport). L'évolution des compartiments et de l'écosystème peut ensuite être étudiée en comparant les mesures ou notations enregistrées lors des campagnes successives. Les caractérisations/déterminations les plus généralement réalisées sur les différents compartiments sont détaillées dans l'encadré en page 24.

N° département et Localisation	Nom du Dispositif	Essence	Âge du peuplement à l'installation	Date d'installation du dispositif	T	N	P2O5	K2O	CaO	MgO
8 Forêt Domaniale des Potées	Les Potées	Chêne Hêtre Douglas TSF	10-150	1995	*				*	*
8 Forêt Domaniale de Château-Regnault Parc 31 (ex 10)	La Croix Scaille Old	Épicéa commun	60	1980	*	*	*		*	*
8 Forêt Domaniale de Château-Regnault Parc 30 (ex 09)	La Croix Scaille dose	Épicéa commun	60	1990	*				*	*
22 Forêt Domaniale de Coat-an-Hay Parc 44, 45, 51, 55, 61	Coat-an-Hay	Chêne & Hêtre (10 ans) Douglas (10 ans) Pin Laricio (10 ans) Douglas (30 ans) Épicéa commun (30 ans) Épicéa de Sitka (30 ans)	10 ou 30	1995	*				*	*
22 Forêt Domaniale de Coat-an-Noz Parc 7	Coat-an-Noz	Hêtre	10	1995	*				*	*
35 Forêt Domaniale de Fougères Parc 75, 77	Fougères	Hêtre	60	1972	*	*	*	*	*	
41 Forêt Domaniale de Blois Parc 159	Blois	Chêne	Régé 5/6 ans	1981	*	*	*	*	*	*
41 Forêt Domaniale de Blois Parc 81	Blois	Chêne (régénération naturelle)	Régé	1981	*	*	*	*	*	*
58 Forêt Domaniale de Breuil-Chenu	Breuil	Douglas Épicéa commun Pin Laricio Sapin	0	1980						
61 Forêt Domaniale d'Andaines Parc 157	ONF_STIR Andaines	Pin Sylvestre (plantation)	0	1998	*		*	*	*	*
61 Forêt domaniale d'Ecouves Parc 61	ONF_STIR Ecouves	Chêne sessile (régénération)	-15	1998	*		*	*	*	*
67 Forêt Communale de Russ Parc 20	Russ	Sapin pectiné	105	1985	*	*	*	*	*	*
68 Forêt Communale du Bonhomme Parc 60, 71	Le Bonhomme (Cie)	Épicéa commun	50	1991	*	*	*	*	*	*
72 Forêt Domaniale de Sillé le Guillaume Parc 305	ONF_STIR Sillé-Le-Guillaume	Chêne sessile (plantation après résineux)	0	1997	*		*	*	*	*
72 Forêt Domaniale de Perseigne Parc 225	ONF_STIR Perseigne	Chêne sessile (régénération)	-15	1997	*		*	*	*	*
72 Forêt domaniale de Bercé Parc 133, 134	Bercé – les Trembles	Chêne	50	1970	*	*		*	*	*
72 Forêt Domaniale de Bercé	Bercé – Rond de May	Chêne	30	1968	*	*		*	*	*
72 Forêt Domaniale de Bercé	Bercé – Gaie Mariée	Chêne	30	1968	*	*		*	*	*
88 Forêt Domaniale de Darney Parc 453, 454	Darney	Hêtre	110	1972	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Communale d'Humont	Humont	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné	35, 60	1991	*				*	*
88 Forêt Communale d'Humont	Humont	Hêtre	60	2005	*				*	*
88 Forêt Communale de Remiremont Parc 96, 99, 100	Remiremont	Sapin pectiné	100	1985	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Domaniale de Cornimont Parc 18, 26, 27, 29, 30, 33, 66, 67, 68, 69, 71	Bassin Versant Cornimont	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné	0 à 200	2003	*				*	*
88 Forêt Domaniale de Senones Parc 100, 101, 103, 104, 105, 123, 124, 126, 127, 200, 202, 203, 204, 206	Bassin Versant Senones	Épicéa commun Hêtre Sapin pectiné Landes à Callune	0 à 150	2003	*				*	*

Tab. 1 : les dispositifs du réseau Amendement en état correct, avec les principales caractéristiques des sites

N° département et Localisation	Nom du Dispositif	Essence	Âge du peuplement à l'installation	Date d'installation du dispositif	T	N	P2O5	K2O	CaO	MgO
8 Forêt domaniale des Manises	Revin	Épicéa commun	0	1986	*	*	*	*	*	*
8 Forêt domaniale de Château-Regnault	X-Scaille HéliMEAC	Épicéa commun	30	1991	*				*	*
8 Forêt domaniale de Sedan	Saint Menges	Douglas (plantation) Peuplements mélangés	0	1980	*	*	*	*	*	*
8 Forêt domaniale de Château-Regnault	X-Scaille (20, 22, 19, 21) Souflerie_Lhoist; RENECOFOR	Épicéa commun	30	1991	*				*	*
19 Forêt privée	Couturas	Douglas (après Épicéa commun)	40	1972	*	*	*	*	*	
41 Forêt privée	Aiguevives	Chêne (régénération naturelle)	0	1982	*	*	*	*	*	*
61 Forêt Domaniale de Perche-Trappe	Perche Trappe	Chêne	0	1987	*		*		*	*
67 Forêt Communale de Grendelbruch Parc 36, 37	Grendelbruch	Sapin pectiné	105	1985	*	*	*	*	*	*
8 Forêt Domaniale Château-Regnault	La Croix Scaille dose	Feuillus TSF	30; 150	1991	*				*	*
23 Forêt communale	Le Feix	Épicéa commun	40	1982	*	*	*		*	
33 Forêt privée	Pierroton	Pin maritime	14	1968	*	*	*	*	*	*
40 Forêt privée	Mimizan	Pin maritime	0	1957	*	*	*	*	(*)	(*)
43 Forêt Domaniale de Pinols	Pinols	Épicéa commun	58	1970	*	*	*	*	*	
57 Forêt domaniale d'Abreschwiller Parc 246	Grossmann	Épicéa commun	75	1985	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Domaniale de Mortagne Parc 14, 22	Mortagne	Sapin	70	1985	*	*	*	*	*	*
88 Forêt Domaniale de Vologne Parc 42, 44	Vologne	Sapin	70	1985	*	*	*	*	*	*

Tab. 2 : les dispositifs du réseau Amendement en mauvais état ou présentant peu d'intérêt scientifique (orange clair) et détruit (orange foncé), avec les principales caractéristiques des sites



Prélèvement d'humus et carottage de sol

Caractérisations des différents compartiments de l'écosystème

- **Analyses chimiques des sols**, horizon par horizon (pédologique ou prédéfini) : pHeau, C, N, cations échangeables* K, Ca, Mg, Na et P assimilable. La densité apparente (ou masse volumique) et l'épaisseur des horizons permet ensuite de calculer les stocks du sol en éléments disponibles pour les plantes, c'est-à-dire facilement mobilisables (cations échangeables et P assimilable).
- **Analyses chimiques des humus et évaluation des quantités de matière sèche à l'hectare**. Les analyses permettent notamment de connaître la concentration en éléments totaux (K, Ca, Mg, P...). La quantité de matière sèche à l'hectare permet ensuite de calculer des stocks dans cette litière au sol.
- **Analyses chimiques des feuilles ou aiguilles** : C, N, S, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Cu, Zn. La feuille ou aiguille est un organe très actif et sa composition chimique peut donc renseigner sur l'état nutritionnel du peuplement en comparaison d'un état de nutrition optimale (Bonneau, 1995). En complément, l'état sanitaire des houppiers par observation visuelle (protocole DSF) est régulièrement noté sur certains dispositifs.
- **Inventaires en plein des peuplements** : croissance radiale (C130), parfois hauteur.
- **Inventaires des espèces pour les strates arborée, arbustive, herbacée et muscinale**. L'inventaire est réalisé en abondance-dominance suivant la méthode de Braun-Blanquet (1932). Les relevés floristiques des essais les plus anciens du réseau ne sont pas toujours disponibles; il n'est alors pas possible de connaître la composition floristique juste avant l'épandage des produits.
- **Biomasse-minéralomasse des peuplements** : de façon plus sporadique, des campagnes de mesure de biomasse-minéralomasse sur arbres entiers ont été conduites sur certains dispositifs. Cette approche permet de connaître la répartition des éléments (N, S, P, K, Ca, Mg...) dans différents compartiments anatomiques (tronc, branche...) et commerciaux (diam > 4 cm, diam > 7 cm...) à l'échelle d'un peuplement. La variation des stocks entre deux dates permet également d'évaluer le prélèvement net par les arbres (immobilisation nette annuelle dans la biomasse aérienne).

Glossaire (mots marqués d'un « * »)

Approche isotopique : utilisation d'un isotope particulier comme traceur pour comprendre le cheminement d'un élément dans un système, en l'occurrence ici l'écosystème forestier

Cations échangeables : cations retenus sur le complexe adsorbant (formé notamment par certaines argiles et/ou la matière organique du sol) dont ils compensent la charge négative et susceptibles d'être remplacés charge pour charge par d'autres cations provenant de la solution du sol. Les principaux cations échangeables sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} et H^+ .

Cycles biogéochimiques : succession de transferts d'un élément ou d'une substance chimique au sein d'un écosystème, impliquant particulièrement les différents horizons des sols et les plantes. On peut s'intéresser aux cycles du carbone, de l'azote, du calcium, etc.

Dendrochimie : analyses chimiques des cernes de bois, permettant notamment de mieux comprendre l'histoire d'un peuplement et de sa croissance

Isotope : chaque élément chimique a plusieurs isotopes, possédant le même nombre d'électrons et de protons, mais un nombre différent de neutrons dans le noyau; les propriétés chimiques des isotopes d'un même élément sont presque identiques.

Traceur : substance, naturellement présente dans le milieu ou artificiellement introduite, permettant l'étude des processus physiques, chimiques ou biologiques du milieu dans lequel il se trouve

Certaines placettes ont également été fortement instrumentées pour devenir des sites ateliers (Potées, Breuil-Chenu, Fougères) dont l'objectif principal est d'étudier la circulation des éléments, les cycles biogéochimiques* à l'échelle de l'écosystème. Des collecteurs d'eau (lysimètres) sont alors installés à différents niveaux de l'écosystème (au-dessus du couvert, sous le couvert, à différentes profondeurs dans le sol), ainsi que des capteurs (humidité, température...) et d'autres types de collecteurs (bacs à litière...), afin d'évaluer les flux d'éléments entrant, circulant dans l'écosystème forestier et en sortant, au pas de temps mensuel pendant plusieurs années. Les suivis classiquement réalisés sur les dispositifs du réseau (sol, humus, foliaire, croissance) a minima tous les 10 ans ne donnent qu'une image très partielle du fonctionnement de l'écosystème; l'étude des flux à une échelle de temps fine permet de comprendre en détail ce fonctionnement.

Les différents échantillons solides collectés sur ce réseau ont pour la plupart été référencés et conservés par l'unité BEF. Les bases de données regroupant l'ensemble des données disponibles sur ce réseau sont en cours d'élaboration. Les sites en mauvais état ou détruits (tableau 2) sont également intégrés à ce travail de sauvegarde des données et des échantillons.

Limites du réseau Amendement

De par la dispersion géographique des sites et leur historique éparpillé, les paramètres climatiques et édaphiques, les essences et, pour une même essence, l'âge des peuplements peuvent varier d'un site à l'autre. De plus, les traitements appliqués (produits et doses) ne sont pas toujours les mêmes. Enfin, la date des mesures et l'intervalle temporel entre deux campagnes diffèrent aussi bien souvent. Toutefois, les paramètres et les méthodes de suivis sont similaires entre sites, ce qui constitue un atout majeur pour le réseau.

Rappel des principaux effets de l'amendement

Les dispositifs existants ont d'ores et déjà permis de répondre à de nombreuses questions concernant la pratique de la fertilisation. Les résultats concernant l'apport de fertilisants N, P et K ne seront pas développés dans cet article et l'ouvrage de M. Bonneau peut être consulté à ce sujet (Bonneau, 1995). Nous nous focaliserons ici sur la pratique de l'amendement en forêt, sur sols forestiers acides, le réseau ayant très majoritairement servi ce propos depuis les années 1980. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux effets de l'amendement raisonné (adéquation entre les besoins et les apports), observés sur des placettes amendées en comparaison de placettes témoins. Certains dispositifs du réseau permettent d'étudier l'effet « dose » avec des apports plus élevés en certains éléments (qui peuvent entraîner des modifications plus drastiques de l'écosystème), mais ce n'est pas l'objet de cette présentation.

Les conclusions ci-après sont un résumé succinct des connaissances actuelles. La poursuite des recherches permettra entre autres de conforter ou d'affiner ces conclusions sur des échelles de temps plus longues (> 40 ans).

Acidité des sols et réserves disponibles

L'acidité des sols réduit le fonctionnement biologique avec notamment une forte diminution voire la disparition des populations de vers de terre, qui se traduit entre autres par des humus épais. Dans les quelques années qui suivent l'amendement, l'épaisseur des humus diminue progressivement et leur pH augmente. Ce processus s'accompagne très souvent d'une augmentation de la biomasse de vers de terre dans les sols amendés, celle-ci étant facilitée si ces populations étaient présentes avant l'apport. Ces observations témoignent d'une amélioration nette du recyclage des matières organiques

(et des nutriments associés) dans l'écosystème. Ces effets peuvent perdurer plusieurs décennies et contribuent grandement à l'amélioration de l'alimentation minérale du peuplement.

Quelques années après l'apport d'amendement, on voit aussi le pH (plus le pH est faible, plus le sol est acide) et le taux de saturation S/T (plus le S/T est élevé, plus le « garde-manger » est rempli) augmenter dans les premiers horizons du sol (0-10cm). L'augmentation du pH du sol et du S/T, donc la réduction de l'acidité, se propage ensuite progressivement dans le profil de sol, depuis la surface vers la profondeur. Cette étape peut prendre plusieurs décennies et contribue durablement à la restauration de l'écosystème. L'intensité du processus de réduction de l'acidité du sol ainsi que son étalement temporel dépendent de plusieurs facteurs (type d'amendement, type de sol, essences en présence...).

Les stocks de Ca et Mg échangeables* augmentent progressivement dans les sols dans les années qui suivent un amendement calco-magnésien et ces éléments se maintiennent dans le système sol-plante pendant plusieurs décennies. Ceci tient au fait que les cycles biogéochimiques* sont très conservatifs et les éléments sont activement recyclés par la végétation, ce qui limite les déperditions. Il faut toutefois veiller à bien raisonner l'apport (quels éléments et quelles doses) pour ne pas engendrer sur le moyen ou long terme une carence en un élément qui n'était pas limitant pour la croissance des arbres avant l'apport. Un exemple bien connu est celui du potassium (K), qui peut devenir limitant dans un écosystème amendé avec de la dolomie seule (Ca-MgCO₃).

Pour plus d'informations, voir les travaux de Renaud *et al.* (2009a), Toutain *et al.* (1988)

Qualité des eaux de surface

La qualité chimique des eaux traversant les profils de sols se trouve améliorée par l'apport d'amendements, en relation étroite avec l'amélioration du fonctionnement des sols. Le pH des solutions de sol augmente, ce qui conduit à réduire considérablement la présence d'aluminium soluble, source de toxicité pour les plantes et les autres êtres vivants. Les eaux sont également plus riches en nutriments, notamment ceux apportés par l'amendement (Ca, Mg). Ceci contribue à une disponibilité accrue en nutriment dans les sols, améliorant la nutrition des peuplements forestiers mais aussi à la qualité des eaux quittant le profil de sol (qui approvisionnent les cours d'eau et les réserves souterraines).

Peu de travaux ont été conduits à des échelles spatiales larges, pour évaluer l'impact d'un amendement terrestre sur la qualité chimique et biologique des cours d'eau. Les seuls dispositifs de ce genre en France sont les bassins versants amendés et témoins de Cornimont et Senones (88, photo 2). La qualité des cours d'eau à l'exutoire des bassins versants est suivie en continu depuis 2002, les amendements ayant été réalisés en 2003-2004 en plein par hélicoptère. Les résultats montrent des effets bénéfiques de l'amendement sur la qualité chimique du cours d'eau sur granit (Cornimont) mais ces améliorations ne permettent pas le retour d'une activité biologique importante dans le cours d'eau. Sur grès (Senones), le suivi n'a révélé jusqu'ici aucun effet de l'amendement sur la qualité des eaux des ruisseaux; l'hypothèse la plus probable est que le temps de transfert de l'eau et des éléments minéraux jusqu'aux ruisseaux est de plusieurs décennies pour ce type de substrat géologique. L'effet de l'amendement sur le cours d'eau dépend en partie du cycle de l'eau (chemins empruntés par les eaux alimentant le cours d'eau, temps de résidence...), qui lui-même dépend de paramètres environnementaux comme le climat ou la géologie.

Amélioration de l'état sanitaire des arbres et retour à une production normale

L'état sanitaire global des peuplements s'améliore dans les premières années qui suivent l'amendement. La fréquence des arbres jaunissants est réduite et le pourcentage de défoliation diminue après amendement. Les teneurs foliaires s'approchent progressivement des valeurs optimales, signe que les ressources bio-disponibles pour les arbres sont suffisantes. L'amendement permet également un retour à une croissance normale des peuplements (photo 3), lorsque qu'une déficience nutritive et/ou une acidification forte limitait cette croissance.

Pour plus d'informations, voir les travaux de Renaud *et al.* (2009a), Lebourgeois *et al.* (1993), Landmann *et al.* (1987 et 1995).

Effet sur le cortège floristique

La composition du cortège floristique est modifiée par l'apport d'amendement, avec l'apparition d'espèces indicatrices de milieu plus fertile (neutro-nitrophile) sans disparition des espèces acidiphiles présentes initialement. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation modérée du pH dans les premiers horizons de sol, qui

n'est pas suffisante pour provoquer la disparition d'espèces acidiphiles.

Pour plus d'informations, voir l'article de Renaud *et al.* (2009 b).

Développement d'un outil de diagnostic des besoins en amendement

Le réseau Amendement, couplé à l'étude des cycles biogéochimiques* conduite depuis les années 1980 à l'unité BEF, a permis d'améliorer grandement les connaissances sur la restauration des écosystèmes forestiers par la pratique de l'amendement. Ces connaissances ont été formalisées dans un outil (Regesol) d'aide à l'estimation des besoins en nutriments pour bon nombre d'essences forestières (épicéa, pin, douglas, chêne, hêtre...), dans différentes conditions stationnelles (Legout *et al.*, 2014).

Regesol est un outil informatique de calcul des besoins de correction de la fertilité des sols forestiers basé sur les stocks disponibles, les cycles biogéochimiques et sur les bilans entrées-sorties de nutriments (Ca, Mg, P, K) dans les écosystèmes forestiers. En pratique, le logiciel calcule les besoins nutritionnels des peuplements sur une période donnée,

les compare aux stocks disponibles dans les sols et aux flux d'éléments entrant et sortant de l'écosystème sur cette même période, puis évalue les apports éventuels d'éléments à réaliser pour corriger l'écart. Le logiciel s'appuie entre autres sur les données issues du réseau Amendement. À ce jour, Regesol n'est pas à la disposition du gestionnaire et les expertises de besoins éventuels en amendement, qui s'appuient en partie sur le logiciel, sont réalisées par l'unité BEF. Dans sa version actuelle, l'opérateur doit en effet maîtriser les connaissances et concepts sous-jacents à la construction du logiciel, pour l'utiliser et interpréter correctement les sorties. Depuis 2010, environ 35000 hectares ont été expertisés par l'INRA dont 5000 hectares environ ont été amendés, majoritairement dans les Vosges. Circonscrites au départ au Massif vosgien, les demandes d'expertise s'étendent aujourd'hui à d'autres régions (Massif central, Ardennes, Alsace, Bretagne).

Intérêt du réseau pour les recherches en cours et futures

Malgré l'ampleur des résultats déjà obtenus, de nombreuses interrogations subsistent ou émergent dans le cadre des changements globaux.

Le réseau, à travers les séries de données enregistrées et les échantillons archivés permet des études rétrospectives et la poursuite des suivis. Il constitue ainsi une richesse à préserver pour explorer de nombreuses questions. Par ailleurs, les connaissances acquises et restant à acquérir sur ce réseau permettent et permettront d'alimenter des modèles, très utilisés aujourd'hui pour la recherche (test d'hypothèse, aide à la compréhension, prédiction) mais également comme outils de diagnostic et d'aide à la décision (ex. : Regesol, présenté précédemment). Pour illustrer plus avant l'intérêt du réseau, voici une évocation non exhaustive des projets en cours et à venir.



INRA - BEF

2- Apport d'amendement par hélicoptère, à la mise en place d'un essai à l'échelle d'un bassin versant (Bassin versant de Cornimont, 2004)

Cycles biogéochimiques* dans les écosystèmes forestiers

Des échantillons des produits apportés sur ces dispositifs, il y a parfois plus de 40 ans, ont été conservés et stockés à BEF ; ces produits comportent des traceurs* géochimiques du cycle et de la dynamique des nutriments dans l'écosystème. Les changements induits par la fertilisation dans les cycles biogéochimiques* des nutriments sont très mal connus et le suivi de ces traceurs dans les humus, les sols et les arbres à différentes dates pourra permettre d'avancer sur ces questions.

Une étude récente menée sur le bassin versant de Cornimont (Bolou-Bi *et al.*, 2016) montre également que les variations naturelles des isotopes* stables du Mg permettent de tracer efficacement le devenir du Mg dans le système sol-plante-eaux de surface. Une approche similaire, utilisant les variations naturelles des isotopes du Mg mais aussi du Ca, est en cours sur 6 autres sites du réseau et concerne des hêtraies. Cette approche pourra par la suite être appliquée à l'ensemble des sites du réseau, pour étudier la généralité des mécanismes sur d'autres stations et d'autres essences.

Caractérisation des effets des amendements

Le suivi des dispositifs les plus anciens montre que les effets positifs des amendements (décrits précédemment) sur l'écosystème sont généralement encore visibles 40 ans après les apports ; cependant ils peuvent s'estomper progressivement. Il reste donc à préciser la durée de ces effets, leur évolution au cours du temps et à poursuivre la caractérisation des effets en fonction du type de station (climat, type de sol, essence en présence...). L'objectif est d'identifier les variables qui contrôlent l'intensité et la durée des effets de l'amendement, afin de raisonner au mieux les apports lorsqu'un déséquilibre nutritionnel est constaté. À l'échelle de la révolution forestière, le coût de l'amendement

au regard des bénéfices reste également à définir.

Changement globaux et risques environnementaux associés

Les pressions auxquelles sont exposés les écosystèmes forestiers et qui sont susceptibles de menacer leur durabilité sont aujourd'hui de plusieurs ordres : on peut notamment citer la demande grandissante en bois énergie, la persistance de dépôts atmosphériques azotés élevés, ainsi que les changements climatiques. Le réseau Amendement peut sur certains points aider à comprendre l'effet potentiel de ces changements sur les écosystèmes forestiers et à imaginer les itinéraires de gestion durable.

De nombreux écosystèmes forestiers à faible fertilité minérale, fortement éprouvés dans le passé (surexploitation, fortes charges acides des dépôts atmosphériques soufrés et azotés...), ont une résilience très faible ; or une acidification marquée perdure, notamment en raison de dépôts azotés encore élevés et/ou de la diminution des dépôts de cations nutritifs (notamment Ca et Mg).

Les suivis réalisés depuis plusieurs décennies sur les dispositifs du réseau permettent d'alimenter une réflexion sur les mesures de gestion à envisager pour ces écosystèmes, dont l'utilisation d'amendement.

L'étude sur le long terme de la fertilité minérale d'écosystèmes forestiers réalisée dans les dispositifs du réseau Amendement, combinée à des mesures de stocks de nutriments (arbres, humus, sols...), est un outil puissant pour appréhender les disponibilités et potentialités en « bois énergie » des écosystèmes forestiers sans impact négatif sur le milieu, ou pour prévoir si nécessaire un apport de nutriments compensatoire. L'amendement est une pratique curative (restauration des sols dégradés) mais qui peut également être appliquée à des fins préventives pour maintenir (soutenir) la fertilité lorsqu'elle est menacée. En raison des besoins croissants en bois énergie voire en bois matériau (pour la construction, par exemple), la question de l'apport raisonné d'amendements et d'autres fertilisants se posera de plus en plus fréquemment pour les écosystèmes forestiers.



3 - Effet de l'amendement sur la croissance des peuplements (Perche Trappe, 2005) : placette témoin à gauche et amendée à droite

INRA - BEF

Enfin, les dispositifs du réseau Amendement constituent des chroniques de long terme incomparables, permettant l'évaluation de l'interaction entre fertilité, climat et accroissement des peuplements. L'usage de la dendrochimie* et d'approche isotopique* notamment, devrait permettre d'identifier et d'évaluer ces interactions, comme par exemple l'impact à long terme d'une sécheresse sur les écosystèmes forestiers, sur leur résilience, en fonction de la fertilité.

En résumé et pour conclure

Dans le domaine de la gestion de la fertilité des sols comme dans bien d'autres, le problème se pose du devenir d'anciens essais expérimentaux qui ont déjà, pour une large part, apporté les réponses aux questions qui ont suscité leur installation. Mais de nouvelles questions surgissent, auxquelles le contexte des changements globaux donne une ampleur inédite qui invite à capitaliser les connaissances pour les prolonger, les analyser sous d'autres perspectives, les confronter à d'autres approches. Les anciens essais y trouvent un regain d'intérêt, individuellement mais aussi et surtout avec la puissance d'un réseau de sites et de données de qualité (anciennes, actuelles et à venir), pérennisé pour faire face à des enjeux essentiels.

Arnaud LEGOUT
Claude NYS
Serge DIDIER
 UR 1138 – BEF
 INRA, Centre de Nancy

Claudine RICHTER
 ONF, département RDI

Bibliographie

Bolou-Bi E., Dambrine E., Angeli N., Pollier B., Nys C., Guerold F., Legout A., 2016. Mg isotope variations to trace liming input to terrestrial ecosystems: a case study in the Vosges mountains. *Journal of Environmental Quality*, vol. 45(1), pp. 276-284

Bonneau M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Nancy, ENGREF, 367 p.

Braun-Blanquet, 1932. *Plant sociology*. New York : McGraw Hill. 439 p.

Landmann G., Bonneau M., Adrian M., 1987. Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le massif vosgien. Est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? *Revue forestière française*, vol. 39, pp. 5-11

Landmann G., Bonneau M., 1995. *Forest decline and atmospheric deposition effects in the French Mountains*. Springer. 461 p.

Lebourgeois F., Becker M., Bonneau M., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. *Revue forestière française*, vol. 45, 1993, pp. 639-650

Legout A., Didier S., Nys C., 2014. REGESOL: a diagnostic tool for forest soil improvement by liming. *Revue Forestière Française*, vol. 66, pp. 632-634

Renaud J.-P., Picard J.-F., Richter C., Legout A., Nys C., 2009 a. Amendements calco-magnésiens et fonctionnement écologique : bilan des expériences conduites dans l'est de la France (massif Vosgien et Ardennes). *Revue Forestière Française*, vol. 61 pp. 283-300

Renaud J.-P., Picard J.-F., Richter C., Legout A., Nys C., 2009 b. Influence de l'amendement sur la composition et sur la dynamique du cortège floristique pour des peuplements situés sur des sols acides. *Revue Forestière Française*, vol. 61 pp. 251-266

Toutain F., Diagne A., Le Tacon F. 1988. Possibilités de modification du type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. *Revue Forestière Française*, vol. 40, pp. 99-107