



HAL
open science

Le réseau Douglas : un dispositif dédié à la compréhension de l'effet de cette essence sur le cycle de l'azote

Bernhard Zeller, Arnaud Legout, Jacques Ranger, Bruno Gratia, Séverine
Bienaimé, Pascal Bonnaud, Gilles Nourrisson, Jérôme Demaison,
Marie-Christine Gehin, Serge Didier

► To cite this version:

Bernhard Zeller, Arnaud Legout, Jacques Ranger, Bruno Gratia, Séverine Bienaimé, et al.. Le réseau Douglas : un dispositif dédié à la compréhension de l'effet de cette essence sur le cycle de l'azote. *Rendez-vous Techniques de l'ONF*, 2016, 53, pp.24-35. hal-04222677

HAL Id: hal-04222677

<https://hal.inrae.fr/hal-04222677v1>

Submitted on 11 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 Douglas, un dispositif dédié à la compréhension de l'effet de cette essence sur le cycle de l'azote

Le Douglas est aujourd'hui une essence importante du paysage forestier français. Pour autant son introduction est relativement récente et ses effets sur l'environnement, sur le cycle des éléments nutritifs, ne sont pas bien connus. Suite aux études conduites depuis 25 ans par l'INRA sur deux sites principaux, on lui soupçonne un effet de stimulation de la minéralisation de l'azote organique et de la nitrification qui, s'il n'est pas dommageable en soi, peut avoir un effet acidifiant pour certains sols. Reste à explorer cette hypothèse dans une large gamme de stations : c'est l'objet premier du « réseau Douglas » récemment installé et qui nous est présenté ici.

L Le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb Franco) est une essence remarquable qui a et aura une place importante dans la filière bois. Toutefois il est indispensable, pour assurer une gestion durable des peuplements, de bien connaître ses effets sur le sol et sur l'environnement en général. Depuis 25 ans, l'équipe INRA-BEF conduit des recherches à cette fin. Les acquis de ces travaux ont motivé il y a quelques années la mise en place d'un réseau de sites de mesures, destiné à mieux comprendre les processus sous-jacents aux observations faites et les facteurs de contrôle.

Se pose en particulier la question de l'effet de stimulation que le Douglas semble avoir sur la minéralisation de l'azote organique du sol et plus particulièrement sur la nitrification, y compris en sol très acide. La production d'azote minéral sous sa forme nitrique n'est pas en soi dommageable, sauf s'il y a un découplage entre la production et sa consommation dans l'écosystème, à la fois par les arbres et par le système microbien dans son ensemble. Si l'azote nitrique produit n'est pas consommé, alors le sol s'acidifie.

En effet (figure 1) la production de nitrates par les bactéries du sol produit aussi du proton (H^+), qui n'est neutralisé que si le nitrate est prélevé. Le mécanisme est le suivant : tout organisme doit conserver son électro-neutralité et, pour ce faire, élimine dans le milieu l'équivalent en charge électrique de l'ion absorbé ; ainsi, prélever un anion nitrate (NO_3^-) nécessite l'efflux d'un OH^- dans le milieu, capable de neutraliser un proton H^+ . Il se trouve, de plus, que le nitrate est très mobile dans les sols tempérés : s'il n'est pas prélevé, il est évacué dans les eaux de drainage, nécessairement accompagné d'un cation en vertu l'électro-neutralité. Les protons étant fixés très rapidement sur la capacité d'échange cationique (CEC)*, alors, toujours en vertu de l'électroneutralité, de la phase solide cette fois, un cation est désorbé* de la CEC : ce sera le cation le plus facile à désorber dans un contexte donné, d'abord le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) puis l'aluminium (Al). La perte de nitrate et de cations nutritifs (Ca et Mg) correspond à une perte de fertilité chimique pour le sol, à une acidification du sol (perte de cations capables de contrecarrer le processus d'acidification) et à un

stress potentiel pour les eaux de surface, si par exemple du nitrate et de l'aluminium apparaissent dans les ruisseaux (les salmonidés disparaissent quand la concentration en Al^{3+} devient supérieure à $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$).

Nous allons dans un premier temps présenter brièvement les conclusions des travaux réalisés par notre équipe depuis 25 ans sur le Douglas, qui nous ont conduits à tenter d'élucider la question assez générale de contrôle de la végétation sur le cycle des éléments, ici la relation entre Douglas et cycle de l'azote. Dans un second temps, nous présenterons le réseau de sites mis en place dans le bassin de production du Douglas pour explorer cette question, dans des contextes différenciés de fertilité du sol.

Bilan sommaire des études réalisées depuis 25 ans

Trois types de travaux ont été réalisés depuis 25 ans sur le Douglas :

- une approche expérimentale *in situ* recourant à des apports de minéraux frais, pour tester le fonctionnement biogéochimique actuel du sol sous différentes essences dans une large gamme de situations (Augusto, 1999);

Glossaire

Adsorber :
fixer par adsorption*(contraire : désorber)

Adsorption :
fixation réversible de particules, molécules ou ions sur les surfaces des constituants du complexe d'échange

Capacité au champ :
teneur maximale d'un horizon de sol en eau non mobilisable par la seule force de gravité

Capacité d'échange cationique (CEC) :
quantité totale de cations qu'un sol peut adsorber*/ échanger dans des conditions de pH bien définies. Elle est due aux argiles et à la matière organique qui possèdent des propriétés très particulières en ce qui concerne la fixation et l'échange d'ions.

Eléments échangeables :
tous les éléments susceptibles d'assurer la neutralité électrique de des sites d'échange de la CEC* : cations alcalins et alcalino-terreux faussement appelés basiques (Ca, Mg, K, Na, voire Mn) et cations acides (Al et H)

Taux de saturation (S/T) :
somme des cations alcalins et alcalino-terreux rapportée à la valeur totale de la CEC*

Chronoséquence :
succession de peuplements forestiers d'âges croissants, qui représente les principaux stades de développement d'un même peuplement : toutes choses doivent être égales par ailleurs sauf l'âge des peuplements.

pHeau :
logarithme décimal de l'inverse de la concentration d'une solution en H⁺. Le sol n'étant pas une solution, il s'agit d'une mesure conventionnelle réalisée dans des conditions standardisées fixant le rapport solide : eau (1: 5)

Récréation :
quantité d'éléments échangés au niveau de la canopée des arbres, entre un cation ou un anion présent dans la pluie et un homologue présent dans les tissus végétaux.

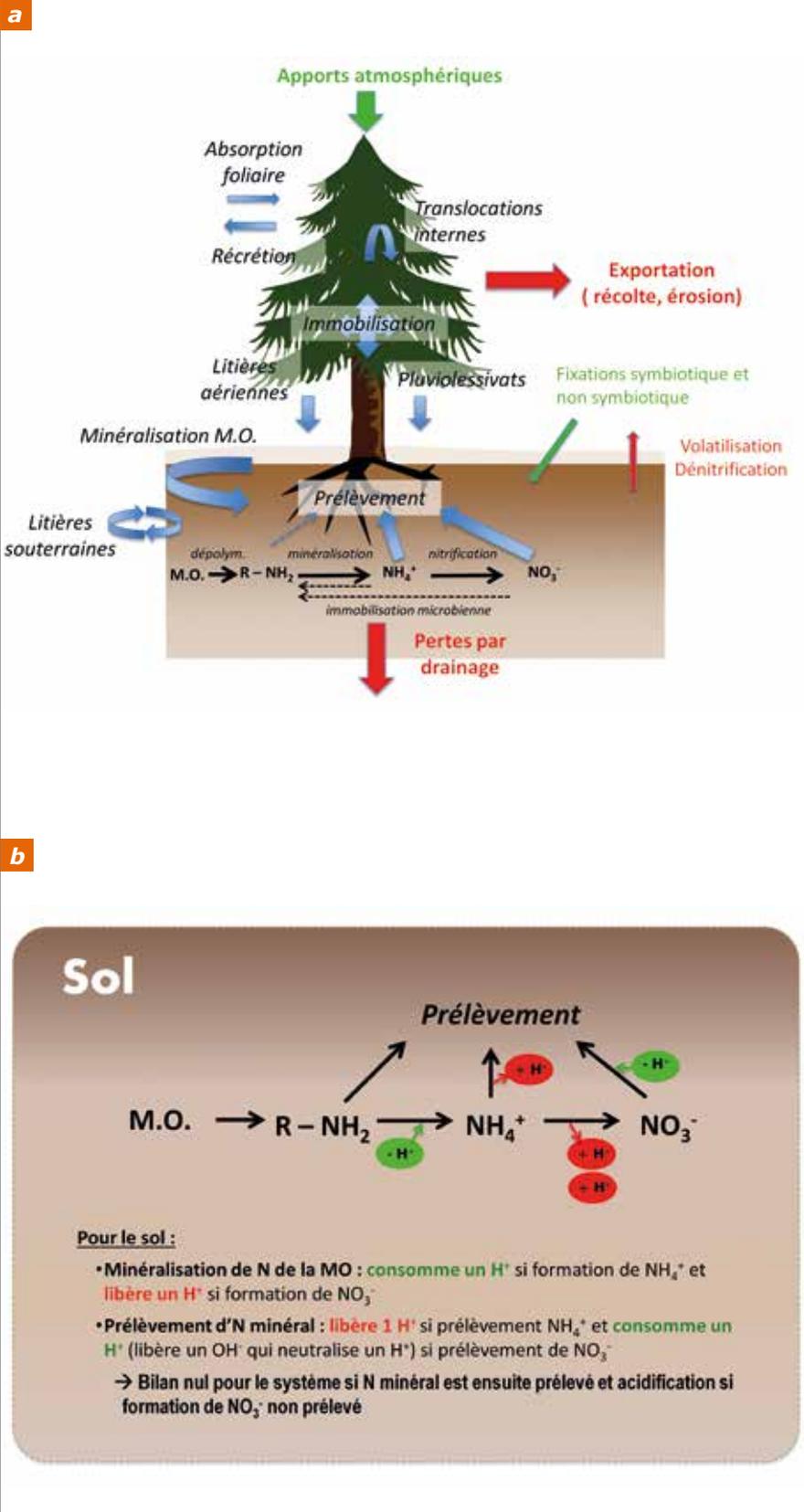


Fig. 1 : (a) cycle simplifié de l'azote dans les écosystèmes forestiers et (b) bilan de proton simplifié pour le sol

(a) : en vert, les entrées d'azote dans l'écosystème; en rouge, les sorties, en bleu le cycle interne à l'écosystème.

- une investigation sur les flux entrées-sorties, dans une chronoséquence* à trois termes (20, 40 et 60 ans) située à Vauxrenard (69), dans le Beaujolais où le Douglas a été introduit dès le début du 20^e siècle, en particulier sur d'anciennes terres agricoles;
- une étude des effets de la substitution des essences sur un sol très acide du Morvan, dans le site atelier en forêt domaniale de Breuil-Chenue (58) dont les documents d'aménagement attestent le caractère très ancien de la forêt.

Voici, rapidement synthétisées, les conclusions de ces travaux qui ont fait émerger des questions scientifiques spécifiques sur la relation entre le Douglas et le cycle de l'azote.

La dérive nitratophile de la végétation

Dans une enquête menée sur une vingtaine de sites où au moins trois essences pouvaient être comparées, l'indicateur de végétation spontanée montrait clairement la dérive de la végétation spontanée vers les nitratophiles sous les plantations de Douglas quand on la compare aux feuillus ou à l'épicéa (Augusto, 1999).

La forte nitrification dans la chrono-séquence sous Douglas du Beaujolais

Les travaux sur la chronoséquence de Vauxrenard ont montré, dans un contexte de sols acides, que les sols sous les plantations de Douglas présentaient une très forte minéralisation de l'azote organique du sol et un niveau très élevé de nitrification. Le passé agricole pouvait cependant expliquer une partie de ce comportement (Jussy *et al.*, 2000, Marques *et al.*, 1997).

L'effet surprenant d'une coupe à blanc de Douglas dans le Beaujolais

L'effet de la coupe à blanc, dans un sol riche en matière organique et où les agents nitrifiants sont présents, aurait dû se traduire par un flux important

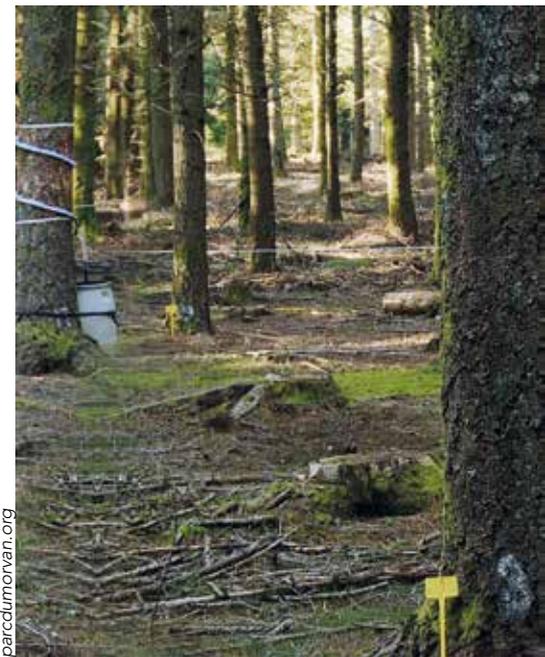
de nitrates (et de cations), puisque le flux de drainage d'eau augmente lorsque le sol est mis à nu. Or c'est l'inverse qui a été observé, avec une réduction drastique et immédiate du flux de nitrates drainés. La mesure *in situ* de la minéralisation par la méthode de Raison confirme qu'il y a une diminution de la nitrification (Jussy *et al.*, 2000). Une hypothèse permettant d'expliquer cette diminution est l'arrêt de la stimulation de la nitrification par le Douglas. Autrement dit, le Douglas pourrait contrôler la nitrification mais, comme aucune autre essence n'a été étudiée en même temps dans les mêmes conditions, cela reste au niveau de l'hypothèse à tester.

L'effet stimulant de la minéralisation de l'azote et de la nitrification sous Douglas dans le Morvan

Dans l'expérience de comparaison d'essences mise en place en 1976 en forêt de Breuil-Chenue (Bonneau, 1977), les tests de minéralisation nette et brute au laboratoire en conditions contrôlées, ont montré une très forte minéralisation sous Douglas en comparaison d'autres essences. Les travaux menés dans le cadre d'une thèse ont confirmé le caractère stimulant du Douglas pour les agents nitrifiants du sol, et ont identifié un contrôle d'origine racinaire à ce mécanisme (Andrianarisoa *et al.*, 2010). Une plantation comparative des mêmes essences a été mise en place en 2007 pour suivre la dynamique initiale de ce contrôle qui s'est avéré très rapide, dès le démarrage de la plantation (Ziegenfuhr, 2008).

L'effet du niveau de fertilité minérale sur les pertes de nitrates (et cations) sous Douglas dans le Morvan

Un apport de calcium et phosphore, réalisé préalablement à la plantation (Bonneau *et al.*, 1977) pour contre-carrer l'acidification des sols sous les résineux, a montré un effet extrêmement bénéfique dans le contexte des sols très acides et désaturés de Breuil,



parclumorvan.org

Un des premiers sites d'étude des effets du Douglas : le site atelier de Breuil-Chenue (58)

avec une réduction des concentrations en nitrates dans les solutions du sol (Jaffrain, 2010). Les résultats montrent que la nitrification n'est pas modifiée mais que la végétation et les organismes du sol semblent immobiliser ces nitrates quand la fertilité du sol est plus favorable.

La constitution d'un réseau : objectifs, consistance et données disponibles

Le travail approfondi sur les sites ateliers de recherche permet de décortiquer finement les processus mais nous nous heurtons toujours à la généralisation des données observées et aux conclusions associées. Pour valider nos hypothèses, il faut élargir la gamme de situations testées, en étudiant des peuplements de Douglas implantés dans des situations variées de richesse de sols et d'antécédents d'occupation des sols.

Les objectifs précis du réseau sont les suivants :

- tester, dans des sols de nature différente, le caractère général de l'effet stimulant du Douglas sur la

Forêt ou commune	Code Site	Dép.	Altitude (mètres)	Formes d'humus	pH _{H₂O} de l'horizon A
Adinfer	ADI	62	117	HémiModer	3.9
Anglès	PAU	81	802	HémiModer	3.9
Bouillancourt	BOU	80	146	EuModer	3.9
Gaillefontaine	GAI	76	232	EuModer	3.9
Allagnat	ALL	63	1005	EuModer	4.1
Felleries	FEL	59	195	HémiModer	4.1
Meymac	MEY	19	916	DysModer	4.1
Saint Amand le Petit	PEY-T	87	586	DysModer	4.1
	PEY-ESC	87	586	DysModer	4.1
Les Potées	POT-T	08			4.1
	POT-A	08			4.2
Olliergues	OLL	63	643	DysMull	4.2
Le Bez	PIQ	81	649	DysMull	4.3
Pérols sur Vézère	ORL-T	19	840	EuModer	4.3
	ORL-F	19	841	EuModer	4.4
Montreuil en Auge	ROQ	14	79	MésoMull	4.5
Wailly	CONT	80	111	DysMull	4.5
Verreries de Moussans	DOU34	34	685	OligoMull	4.6
Montapas	MONT	58	288	HémiModer	4.7
Sallèdes	SAL-B	63	743	OligoMull	6.9
	SAL-H	63	817	EuModer	4.8
Azy-le-Vif	MIG	58	302	EuModer	5.5
Ceyssat	VULC	63	959	DysModer	5.7

Tab. 1 : principales caractéristiques des dispositifs du réseau ; en grisé, les sites fortement instrumentés



Fig. 2 : allure d'une placette d'observation fortement instrumentée (Fellerie 59)

minéralisation de l'azote organique du sol et sur le taux de nitrification ;

- vérifier s'il existe un seuil de fertilité chimique du sol qui permet l'immobilisation dans l'écosystème des nitrates produits. L'effet spectaculaire des amendements, observé sur le site de Breuil-Chenue, doit être vérifié dans d'autres situations couvrant une large gamme de fertilité chimique. Secondairement il s'agit de voir si l'effet d'une remédiation est le même que celui de la richesse naturelle du sol, si l'apport d'amendement peut compenser la perte des éléments issus du processus naturel d'altération.

Choix des sites

Le choix des sites (récapitulés au tableau 1) a été réalisé à partir d'une enquête diffusée auprès des forestiers de terrain, présentant un cahier des charges strict (site homogène quant au sol, peuplement pur de Douglas, âge compris entre 25 et 45 ans, gestion sylvicole « normale »).

Vingt et une placettes (tous les sites sauf Les Potées, qui a rejoint le réseau tardivement) ont été finalement retenues pour tester le niveau de minéralisation de l'azote et la nitrification. Onze sites (dont deux présentant des modalités amendé/fertilisé et témoin, soit 13 placettes) ont été instrumentés lourdement pour mesurer le flux d'eau et de nutriments transférés au travers la canopée et drainés à la base du sol (60 cm). L'ensemble de ces placettes constitue le « réseau douglas ». Il s'agit de placettes délimitées mais non clôturées dont l'emprise au sol est d'environ un demi-hectare. À titre de comparaison, le nombre de placettes et l'instrumentation en place du réseau Douglas sont du même ordre de grandeur que les placettes de niveau A3 (suivi intensif) du réseau RENECOFOR. L'allure d'une placette fortement instrumentée est présentée figure 2.

Observations et données disponibles

Les données de climat général sont obtenues auprès de Météo France via l'Unité de Service Agroclim du Centre Inra d'Avignon. Les stations météorologiques de référence pour chaque site ont été sélectionnées suivant plusieurs critères : les paramètres mesurés, la proximité et la situation par rapport au site du réseau (Bloch, 2013).

Les mesures et le suivi réalisés sur les placettes (se reporter à l'encadré) visent à apporter tous les éléments pour calculer un bilan de fertilité de ces écosystèmes en référence aux travaux de Ranger et Turpault (1999) : les stocks de carbone et d'éléments nutritifs majeurs sont quantifiés dans la végétation et dans les sols. Les flux solides (litières) et en solution sont quantifiés sur une base mensuelle.

Toutes ces données sont rapportées à l'hectare, ce qui les rend directement utilisables pour les questions pratiques. À savoir : quelle quantité d'éléments y a-t-il dans le sol et dans les arbres en fonction des compartiments, quelle quantité sera exportée en fonction du type d'exploitation, quelles sont les pertes par drainage, quelle quantité faudrait-il restituer pour compenser les pertes liées à la sylviculture (récolte + drainage +...)?

Toutes les informations sont consignées dans une base de données, conçue et gérée par INRA-BEF, comprenant les données brutes et élaborées ainsi que les métadonnées associées (les méthodes utilisées pour l'observation, la mesure ou l'estimation). Cette base contient actuellement environ 500000 données climat, 2000 données sol, 125000 données solutions et 4000 données végétation.

Réseau Douglas :

Les peuplements

La biomasse et la minéralomasse des peuplements ont été quantifiées sur chaque site instrumenté de la manière suivante :

- **Biomasse** : la biomasse du tronc a été calculée en appliquant à l'inventaire de chaque site, les tarifs de biomasse établis pour le Douglas par Ponette *et al.* (2001) à partir de sites Renécofor. La biomasse des branches et celle des aiguilles ont été estimées à partir des données de peuplement par des relations obtenues sur 10 sites étudiés antérieurement (Beaujolois, Ranger *et al.*, 1995, RENECOFOR, Ponette *et al.*, 2001 et Morvan, Sicard *et al.*, 2005), respectivement avec la surface terrière et avec la structure du peuplement (nb de tiges).
- **Minéralomasse** : pour le tronc, les concentrations en éléments minéraux ont été mesurées dans le bois et l'écorce, puis rapportées à la biomasse de ces compartiments sur chaque site du réseau. Pour les branches et les aiguilles, les relations issues des 10 sites étudiés antérieurement et cités ci-dessus, ont été utilisées. Les résultats sont en conséquence moins précis.

Les retombées de litières sont évaluées sur les sites « instrumentés » par récolte saisonnière de quatre bacs à litière (type RENECOFOR), pesée et analyse chimique des échantillons. Les retombées sont calculées en matière sèche, carbone et éléments nutritifs majeurs ; les données portent actuellement sur deux années.

Le prélèvement annuel d'éléments majeurs aux dépens des réserves du sol a été calculé à partir de la formule développée par Ranger et Bonneau (1984) :

prélèvement = immobilisation + restitutions (litière et récréation*) avec :

immobilisation moyenne = minéralomasse ligneuse/âge du peuplement

litières = moyenne des deux années d'observation actuellement disponibles

récréation = estimation à partir des observations réalisées sur les sites du Beaujolais

Les sols

Les profils de sol ont été décrits à partir d'une fosse pédologique ouverte pour l'occasion. Les prélèvements de sols ont été réalisés en quatre points de chaque dispositif puis mélangés afin d'obtenir un composite par horizon. Les échantillons ont ensuite été préparés (séchage à 35 °C, tamisage à 2 mm avec pesée de la fraction >2 mm) en vue de leur analyse au Laboratoire INRA d'Analyses des Sols d'Arras. Pour chaque site les données suivantes sont disponibles : la granulométrie, la masse volumique sèche, le pH (eau et KCl), les éléments totaux (C et N organiques ; K, Ca, Na, Mg, Mn, Al, Fe et P) ; les oxydes, la capacité d'échange cationique (CEC)* et les éléments échangeables* et le phosphore assimilable.

Les données quantitatives telles que les stocks d'éléments totaux, échangeables ou le TRB (réserve totale en bases) ont été calculées pour le profil complet ou pour des épaisseurs particulières, correspondant par exemple à la densité maximum d'enracinement (0-20 cm).

Les solutions

Trois colliers de troncs et quatre collecteurs de pluviolessivats par site permettent de récolter les solutions sous le couvert forestier. Des bougies poreuses installées à -15 cm et -60 cm (4 répétitions par profondeur) et reliées à un dispositif de mise sous vide, permettent de collecter les solutions de sols en période non saturée.

Matériels et méthodes

Une fois par mois, les solutions (pluiolessivats, ruissellements de troncs, solutions du sol) sont collectées et analysées (pH, C, NO_3^- , NH_4^+ , K, Ca, Na, Mg, Mn, Al, Fe, S, SO_4^{2-} , Cl^- , P et H_2PO_4^-) sur chaque placette instrumentée.

Les premières données ont été obtenues en octobre 2012 et les suivis continuent depuis lors.

Les flux hydriques et flux d'éléments

Ces flux ont été évalués sur les placettes instrumentées. Le modèle Biljou (Granier *et al.*, 1999) a été utilisé pour évaluer les flux d'eau journaliers dans les différents compartiments de l'écosystème, à partir des données climatiques (Météo France) et des données collectées sur les sites (sols et peuplements). La validation des flux obtenus est effectuée à partir des mesures d'humidité du sol réalisées en continu au pas de temps de 4 heures, par des sondes capacitatives (Decagon EC5), installées à 2 profondeurs (-15 et -60 cm, 5 répétitions par profondeur).

Les flux d'éléments sont obtenus sur chaque placette en couplant les flux d'eau traversant un compartiment pendant une période donnée à la concentration en éléments dans ce même compartiment pendant cette même période. Ces flux d'éléments sont calculés au pas de temps mensuel, les concentrations en solution étant disponibles à ce pas de temps.

Minéralisation de l'azote ex-situ et in-situ

La comparaison entre les méthodes *ex* et *in situ* doit permettre de comprendre comment le potentiel estimé par la méthode des incubations *ex situ* s'exprime *in situ*.

La minéralisation de l'azote *ex situ* a été évaluée sur 21 placettes du réseau (tous les sites sauf Les Potées) par incubation en conditions contrôlées au laboratoire. Quatre échantillons de sol frais de l'horizon [0-10cm] ont été prélevés, tamisés à 4 mm puis mis à incuber pendant 42 jours (à 20 °C, humidité du sol ~60 % de la capacité au champ*). Des mesures de concentration en azote ammoniacal (N-NH_4^+) et en azote nitrique (N-NO_3^-) sont réalisées par colorimétrie à T0, à 21 et à 42 jours. Le potentiel net de minéralisation (PNM), ou de nitrification (PNN), de l'azote est la production journalière d'azote minéral (NH_4^+ et NO_3^-), ou d'azote nitrique seul (NO_3^-), durant la période d'incubation :

$$\text{PNM (mg N/kg sol/j)} = ([\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+]_{\text{final}} - [\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+]_{\text{initial}}) / \text{nombre jour d'incubation}$$

$$\text{PNN (mg N/kg sol/j)} = ([\text{NO}_3^-]_{\text{final}} - [\text{NO}_3^-]_{\text{initial}}) / \text{nombre jour d'incubation}$$

La disponibilité d'azote minéral total ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) dans les sols a été évaluée *in situ* sur les 11 sites instrumentés du réseau. Pour ce faire, des résines échangeuses d'ions ont été installées à 10 cm de profondeur dans les sols. Ces résines, cationiques ou anioniques, permettent de piéger respectivement N-NH_4^+ et N-NO_3^- . Elles ont été conditionnées en capsules, puis installées début 2012 et prélevées tous les 2 mois environ de mai 2012 à juillet 2013. N-NH_4^+ et N-NO_3^- sont extraits par HCl ou NaCl molaire, et les concentrations sont déterminées par colorimétrie.

Résultats actuels – Les caractéristiques du réseau

Les peuplements

La biomasse aérienne ligneuse varie sur le réseau de 107 tonnes de matière sèche par hectare à Meymac à 436 t/ha pour le site d'Allagnat soit d'un facteur 4 (tableau 2).

La minéralomasse d'azote varie de 280 kg par ha à Meymac à 735 kg par ha à Montapas soit un facteur 2,5 seulement. Celle de calcium varie de manière plus spectaculaire, de 72 kg par ha à Meymac à 534 kg par ha à Olliergues, soit d'un facteur 7,5. Ces simples données font entrevoir la nécessité de bien caler les interactions peuplement x milieu pour modéliser les exportations. Elles soulignent des efficacités apparentes très différentes entre les peuplements dans l'utilisation des ressources nutritives pour produire leur biomasse.

Le tableau 3 concernant le site de Gaillefontaine (76) illustre les données qui peuvent être calculées pour chacun des sites instrumentés. La variabilité interannuelle est forte, et c'est la raison pour laquelle, dans tous les travaux conduits en système naturel, il faut une durée minimum d'observation pour intégrer cette variabilité et fournir des résultats permettant de tirer des conclusions quant à l'état du système. Notre expérience nous conduit à proposer 5 ans pour ce laps de temps.

Les sols

Le tableau 4 présente quelques caractéristiques des sols des sites instrumentés du réseau. Le pH_{eau} de l'horizon 0-20 cm varie de 4,1 pour les sites les plus acides (GAI et PAU) à 4,5 (MONT). Le taux de saturation (S/T)* dans l'horizon 0-20 cm varie de moins de 10 % pour les sites de POT-T, MEY et ORL-T à plus de 50 % pour les sites de ALL, CONT, MONT et ROQ. Pour ces sites, les stocks de calcium et magnésium échangeables* sont les plus élevés du réseau, et la valeur particulièrement élevée du S/T dans l'horizon de surface s'explique en grande partie par la

Site	Biomasse aérienne ligneuse	N	P	K	Ca	Mg
	t.ha ⁻¹					
MEY	107	280	16	101	72	22
PAU	264	516	30	151	274	38
OLL	221	534	38	244	534	53
ALL	436	553	40	174	470	48
WAY	246	425	26	152	281	27
MONT	364	735	40	202	519	41
GAI	262	446	22	139	211	28
VIL	266	469	26	162	309	36
ROQ	289	494	29	178	282	33
ORL-T	305	568	30	150	327	38
ORL-F	372	431	37	192	289	46
POT-T	228	521	29	160	265	38
POT-F	276	588	33	190	506	54

Tab. 2 : biomasse et minéralomasse aériennes ligneuses totales des peuplements

Flux	Années	N	P	K	Ca	Mg
Immobilisation moyenne annuelle	2013-2014	7	0,5	2,3	3,4	0,4
Restitution par les litières	2013	25,7	1,7	3,9	25,9	2,7
	2014	25,3	1,9	7,9	29,5	3,1
Récréation foliaire	2013	–	–	7,3	4,1	1,4
	2014	–	–	14,8	4,7	1,6
Prélèvement au sol	2013	32,7	2,2	13,5	33,5	4,5
	2014	32,3	2,4	24,9	37,6	5,1

Tab. 3 : immobilisation moyenne annuelle, restitution par les litières, récréation foliaire et prélèvement d'éléments majeurs du peuplement de Douglas de Gaillefontaine (76) sur la période 2013-2014 exprimés en kg.ha⁻¹.an⁻¹

Pour les définitions, voir l'encadré matériels et méthodes

proportion de Ca sur le complexe d'échange. Ces quelques données illustrent les différences de conditions édaphiques à l'échelle du réseau, qui devraient notamment permettre de mieux comprendre la relation entre la fertilité chimique du sol et l'immobilisation de nitrates produits (cf. propos introductif).

Résultats actuels – La minéralisation de l'azote et la nitrification

La minéralisation ex situ

Dans les sols récoltés sur tous les sites du réseau, la concentration initiale (à l'état frais, T0) de l'azote nitrique varie de 2 à 30 mg N-NO₃⁻ par kg de sol. En moyenne 86 % (± 14 %) de l'azote minéral (ammoniacal et nitrique : N-NH₄⁺ + N-NO₃⁻) se trouve sous forme nitrique. Cette forte proportion de N-NO₃⁻ observée sur tous les sites avant incubation est un premier indice de l'effet du Douglas sur les transformations de l'azote dans le sol, en particulier sur le processus de nitrification.

Lors de l'incubation des sols en conditions contrôlées le potentiel de nitrification (PNN) varie de 0,10 à 1,05 mg N-NO₃⁻ par jour et par kg de sol. Ces mesures de PNN restent dans la fourchette des valeurs observées pour le Douglas lors d'incubations réalisées pour d'autres types de sols forestiers (Andrianarisoa *et al.*, 2008). À l'exception d'un site (Meymac), 90-95 % de l'azote minéralisé est transformé en N-NO₃⁻. La nitrification est très élevée sur tous les sites, d'autant que la plupart d'entre eux sont très acides (figure 3).

Il apparaît ainsi clairement que ces deux indicateurs (concentration en N-NO₃⁻ à l'état frais et PNN) donnent des informations identiques. Ce résultat est intéressant, dans la mesure où l'extraction sur le sol est nettement plus simple à réaliser que l'incubation.

Site	Prof.	pHeau	Argiles	Limons	CEC	S/T	K	Ca	Mg	Na	Mn	Norg	Pass	TRB
			$g.kg^{-1}$ (1)	$g.kg^{-1}$ (1)	$cmol.c.kg^{-1}$ (1)	% (1)								
PAU	0-20 cm	4,1	138	185	6,0	18,4	125	168	28	91	45	4366	933	2126
	0-60 cm	4,2	133	186	4,8	9,6	322	226	38	91	105	10523	3413	7427
GAI	0-20 cm	4,1	193	713	7,1	14,6	249	133	42	5	140	2466	347	1645
	0-60 cm	4,2	183	715	5,7	13,9	779	221	92	25	354	6062	1107	5767
ALL	0-20 cm	4,3	159	498	6,9	52,6	164	624	103	17	51	4419	658	2273
	0-60 cm	4,5	94	518	4,3	77,4	339	1944	283	20	81	8730	1706	7038
FEL	0-20 cm	4,3	313	546	8,9	35,4	299	647	76	12	379	3710	123	3194
	0-60 cm	4,6	316	501	9,6	54,4	1000	4562	839	34	757	8123	306	9405
MEY	0-20 cm	4,4	213	210	8,6	5,9	133	24	19	13	13	6130	130	1666
	0-60 cm	4,6	135	186	5,1	4,33	268	37	23	20	23	24432	1575	4618
POT-T	0-20 cm	4,3	214	673	7,9	9,2	199	109	19	54	10	3300	139	595
	0-60 cm	4,5	221	663	5,3	13,2	498	457	74	144	155	6044	465	1652
POT-A	0-20 cm	4,3	204	741	6,1	15,9	78	116	20	20	62	2033	73	590
	0-60 cm	4,4	206	738	5,9	15,6	257	436	99	59	170	5632	413	1520
OLL	0-20 cm	4,2	184	246	5,9	13,2	128	161	28	0	48	3506	227	2300
	0-60 cm	4,3	166	230	4,3	8,8	442	223	47	0	87	7698	947	8201
ORL-T	0-20 cm	4,5	129	162	6,8	8,2	92	27	15	17	11	3680	57	1325
	0-60 cm	4,7	99	217	3,6	11,1	186	92	33	184	19	8073	810	6972
ORL-F	0-20 cm	4,9	120	133	5,7	11,9	76	55	17	42	7	3819	76	1366
	0-60 cm	5,1	92	238	3,8	13,8	194	146	48	235	15	12130	658	6556
ROQ	0-20 cm	4,3	276	472	14,2	69,3	374	3088	272	18	80	4102	109	1758
	0-60 cm	5,2	294	362	17,1	87,4	944	13148	754	519	105	6273	138	5055
CONT	0-20 cm	4,5	197	726	8,2	60,9	514	1843	201	4'	381	2873	1319	1921
	0-60 cm	4,8	233	697	10,6	78,9	1565	14516	1424	1246	727	6224	4866	7267
MONT	0-20 cm	4,5	260	620	6,9	52,2	279	715	74	0	766	2761	533	1163
	0-60 cm	4,5	276	636	6,5	44,6	1326	6084	1613	0	4126	10037	2169	3747

(1) = moyenne pondérée pour la TF des horizons sur l'épaisseur considérée - (2) = valeur cumulée sur l'épaisseur considérée des éléments dans la terre fine hors cailloux - TRB = réserve totale en bases (Ca+Mg+K)

Tab. 4 : caractéristiques des sols des sites instrumentés du réseau

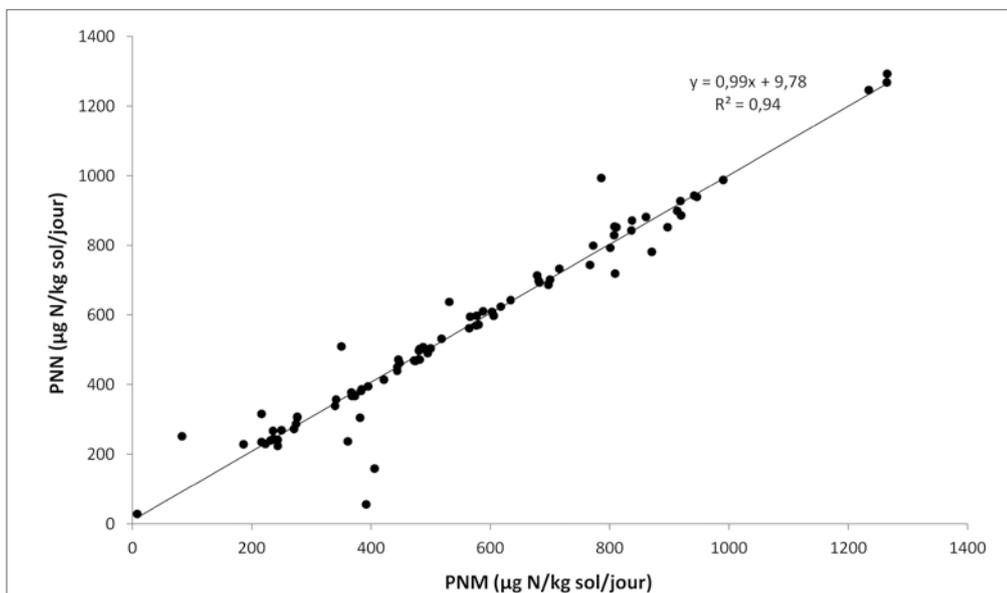


Fig. 3 : nitrification potentielle (PNN) en fonction de la minéralisation potentielle (PNM) de l'azote évaluées ex situ en conditions contrôlées

La disponibilité de l'azote minéral *in situ*

Les capteurs passifs (résines) installés sur les 11 sites instrumentés révèlent une forte variabilité entre les sites avec une accumulation de $N-NO_3^-$ qui varie de 4 à 100 kg $N-NO_3^-$ par ha et par an, avec une moyenne de 42 kg $N-NO_3^-$ par ha et par an. Ces valeurs sont plus faibles que celles estimées par Jussy *et al.* (2000) sur le site de Vauxrenard, mais la méthode n'est pas strictement identique. L'histoire de l'occupation des sols est par ailleurs une variable importante à cet égard.

Ces résultats préliminaires (*ex et in situ*) montrent que, dans les sols du réseau Douglas, l'azote nitrique ($N-NO_3^-$) est la forme principale de l'azote minéral produit par minéralisation. Un fort potentiel de nitrification a en effet été mesuré *ex situ* et la quantité de nitrate accumulée sur les résines *in situ* est bien supérieure à la quantité d'azote ammoniacal ($N-NH_4^+$).

L'essence semble bien être le paramètre déterminant le déclenchement de la nitrification, les paramètres de l'environnement modulant cet effet. Ces travaux se poursuivent pour confirmer cette hypothèse et explorer la relation entre les mesures de minéralisation *ex situ* et la disponibilité *in situ*.

Résultats actuels – Les flux d'éléments en solution et le problème des pertes par drainage

La composition des solutions

Le spectre géochimique des solutions du sol est très large, avec par exemple des valeurs extrêmes (exprimées en micromoles de charge par litre) allant de 1 (Montreuil sur Auge) à 375 (Paucou) pour l'aluminium et de 17 (Meymac, Orluc) à 10580 (Conty) pour le calcium. Ce spectre large respecte le cadre fixé pour répondre aux objectifs qui visent à mettre en relation la richesse du sol, l'immobilisation des nitrates produits, et la qualité des solutions du sol.

Prenons l'exemple de l'effet d'un amendement calco-magnésien sur la physico chimie des solutions de sol. Les observations réalisées sur le site des Potées (Figure 4) montrent que l'effet d'un amendement CaMg (réalisé en 1995) se traduit par des modifications notables de la qualité de la solution du sol à 60 cm de profondeur (abaissement des nitrates et changement des ratios Ca/Al). Les effets de l'amendement sur les solutions de sol sont donc encore positifs et durables plus de 20 ans après l'apport. Il faudra également analyser la différence de comportement avec Breuil-Chenue, où on pourrait imaginer un effet plus net lié à l'addition de P. Ces conclusions sont encore spéculatives à ce stade.

Les flux hydriques

La qualité des solutions est une chose, le flux en est une autre : si la concentration de la solution est forte, mais que le flux d'eau est nul alors les pertes par drainage seront nulles. Toutefois, quantifier un flux d'éléments drainés demeure complexe en forêt où, contrairement à l'agriculture, la quantification directe (en case lysimétrique par exemple) est quasiment impossible. Il faut donc avoir recours à un modèle hydrique que l'on doit calibrer le plus précisément possible. Ces précautions étant prises (cf. méthodologie), il est important (et rassurant) de valider les sorties du modèle par des mesures ; l'humidité du sol est le paramètre clé à cet égard.

La figure 5 présente à titre d'exemple les valeurs d'humidité volumique simulées par le modèle Biljou et celles mesurées *in situ* pour le site de Montapas (58). De façon générale, le modèle reproduit correctement les variations d'humidité dans les sols du réseau Douglas, ce qui constitue une validation des flux hydriques estimés.

Le drainage annuel moyen à -60 cm, pour les 11 sites instrumentés, est présenté dans la figure 6. Il est compris entre 234 mm (CONT) et 748 mm par

an (ORL) et les différences entre sites sont majoritairement liées aux quantités annuelles de précipitation. Les sites bénéficiant d'une pluviométrie annuelle importante (MEY, ORL, PAU) ont les valeurs de drainage annuel à -60 cm les plus élevées ; les sites les moins arrosés (CONT, FEL, GAI, ROQ) ont quant à eux les valeurs les plus faibles. La relation entre la pluie incidente et le drainage est néanmoins modulée par l'évapotranspiration réelle annuelle, même si elle est assez peu variable entre les différents sites (de 517 mm par an pour CONT à 670 mm pour OLL) et par la taille de la réserve utile. En effet, les sites à faible réserve utile (MEY, ORL, PAU, avec une RU <70 mm sur la tranche 0-60cm) ont un drainage relatif à la quantité de pluie incidente plus élevé que les autres sites à plus forte réserve utile.

Les flux d'éléments

Les flux d'éléments ont en l'état été estimés sur les sites instrumentés sur la période 2013-2014. Des tendances se dégagent d'ores et déjà, mais la forte variabilité interannuelle limite les interprétations et nécessite la prudence.

Les données actuelles montrent une relation globale inverse entre les pertes d'aluminium et celles de calcium et magnésium. La figure 7 illustre le cas du magnésium et de l'aluminium : les pertes en aluminium sont très faibles voire inexistantes sur les sites à S/T élevés (>40 %) mais deviennent prépondérantes sur les sites désaturés (S/T <15 %). Les différences de flux entre sites sont quant à elles majoritairement liées aux pertes de nitrate par drainage (cf. propos introductif). La relation entre l'intensité des pertes et les variables environnementales reste néanmoins à approfondir.

Ces résultats confirment que cultiver du Douglas sur sol pauvre a des conséquences sur l'écosystème lui-même (la production est limitée... mais ça regarde le forestier), mais aussi beaucoup plus largement sur

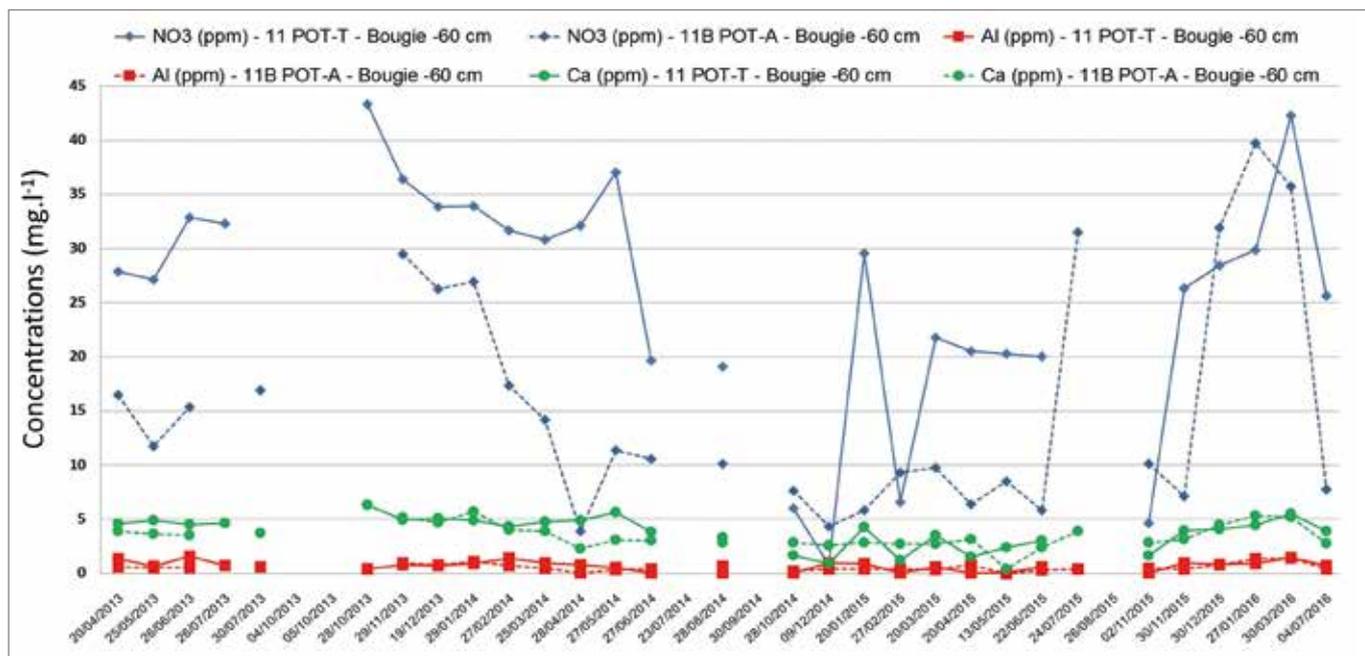


Fig. 4 : concentrations en Ca, Al et NO₃ dans les solutions de sol à -60 cm des placettes témoin et amendée du site des Potées (08)

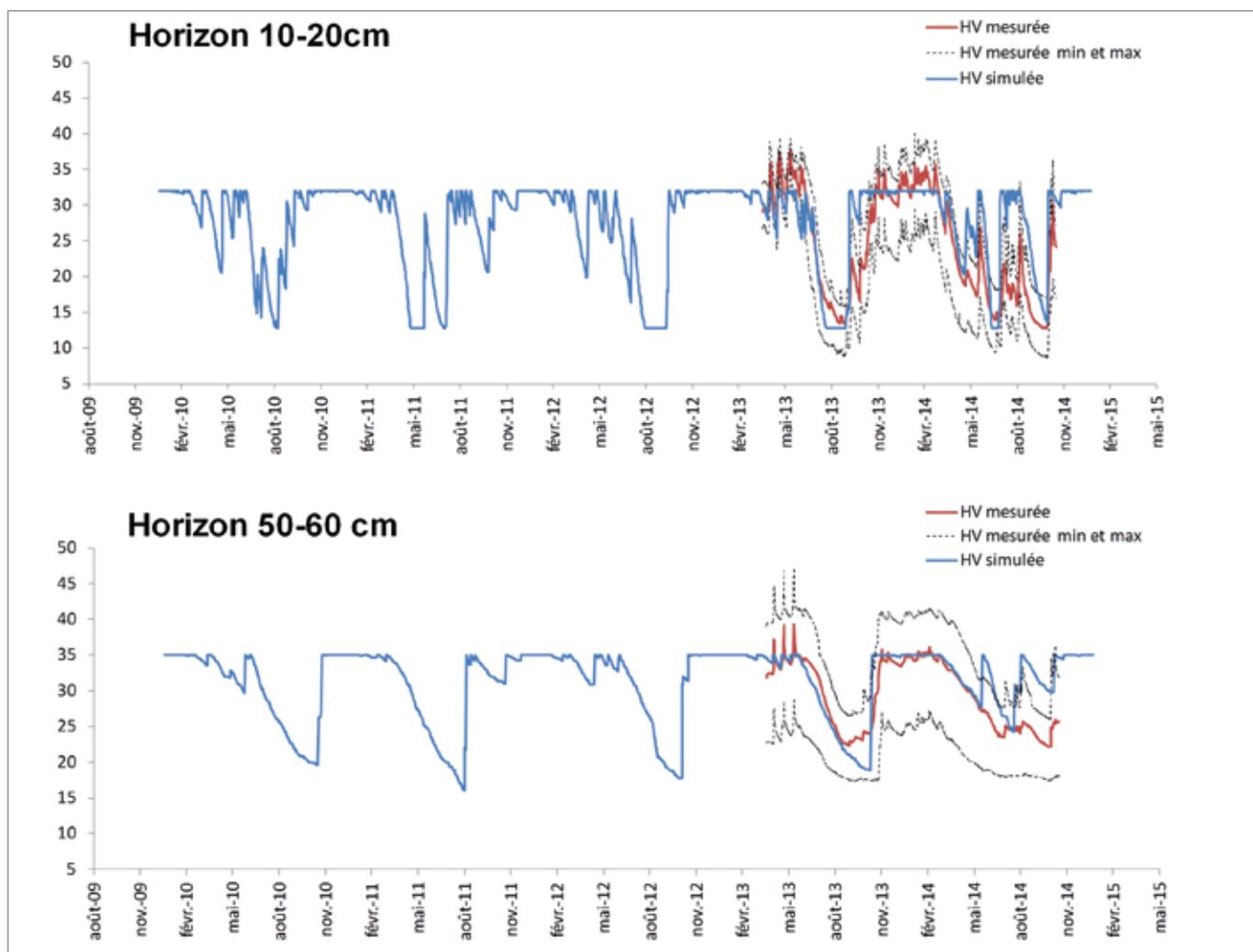


Fig. 5 : comparaison des humidités volumiques simulées par le modèle de bilan hydrique et mesurées par les sondes capacitives in situ pour le site de Montapas (58), pour les horizons 10-20 cm et 50-60 cm

les fonctions environnementales de la gestion forestière (et ça regarde la communauté).

Conclusion

Le réseau Douglas, installé entre mi 2012 et mi 2013 pour tester les effets de cette essence sur l'environnement, est pleinement opérationnel, malgré des moyens humains et matériels limités. Ce réseau ne fonctionne que grâce à un soutien logistique efficace des forestiers de terrain, privés et publics, qui réalisent l'essentiel des prélèvements mensuels de solutions : les sites les plus éloignés sont distants de 1 000 km.

Les données actuelles sont encore partielles, mais elles permettent d'ores et déjà de confirmer le rôle du Douglas dans la stimulation de la minéralisation de l'azote organique du sol et de la nitrification. Les variables climatiques, sylvicoles, environnementales et historiques prises en compte, concourent à moduler l'expression de la nitrification, sans toutefois que l'on puisse en isoler une ou plusieurs très significatives. Dans l'idéal, il faudrait un réseau qui croise toutes les variables importantes : sol x climat x antécédent x essence. C'est évidemment hors de portée. Simplifier les variables à tester serait une autre voie, mais

comment trouver sous un même climat des plantations dont l'occupation de sols différents a été la même avant l'introduction du Douglas ?

Le suivi des solutions du sol permet dès à présent de fixer le contexte géochimique des différents sites, ainsi que quelques tendances fortes dans la dynamique des éléments. Le rôle améliorant des amendements pour la qualité des sols, en particulier pour sa fonction environnementale (qualité des eaux de surface...), se confirme et ces effets positifs sont durables. Toutefois, compte tenu de la variabilité climatique interannuelle forte, il est obligatoire de disposer d'environ 5 années de suivi consécutif pour conclure définitivement quant à l'intensité des flux drainés. Une conclusion générique qui s'impose est que, quelle que soit la fonction considérée, il n'est jamais judicieux de laisser le sol s'appauvrir et s'acidifier car la contrainte va peser sur l'écosystème lui-même, mais aussi sur les écosystèmes dépendants, eaux de surface en particulier.

Enfin, tous les peuplements étudiés sont des premières générations, issues de plantations ; il serait intéressant de compléter ce réseau par des peuplements de seconde génération ou de peuplements issus de régénération

naturelle, pour définir une éventuelle adaptation au cours des générations successives, qui modifierait le cas échéant le comportement observé en première génération de plantation.

Bernd ZELLER
Arnaud LEGOUT
Jacques RANGER
Scientifiques,

Bruno GRATIA
Doctorant,

Séverine BIENAIME
Pascal BONNAUD
Gilles NOURRISSON
Jérôme DEMAISON
Marie Christine GEHIN
Serge DIDIER
Ingénieurs et Techniciens,
INRA-BEF 54280 Champenoux

Et les collègues de la forêt publique et privée:
Laurent BISSONNIER, Expert forestier, 76870 Gaillefontaine
Bernard CATRY, CRPF, 80000 Amiens
David DAUPHIN, École Forestière de Meymac 19250 MEYMAC
Louis GILET, propriétaire forestier, Fellerie 59740
Cristel JOSEPH, CRPF Normandie 50000 Saint-Lô
Marc LAFAYE, CRPF Auvergne, 63370 Lempdes
Magali MAVIEL CRPF antenne d'Albi, La Milliassole 81000 ALBI
Charles PAPAGEORGIOU, ONF, 08230 Tremblay les Rocroy
Jean-François SINET, CRPF, 80000 Amiens
Bruno VANSTAEVEL et **Yann MOZZICONACCI**, CRPF de Bourgogne, Antenne de la Nièvre 58000 NEVERS

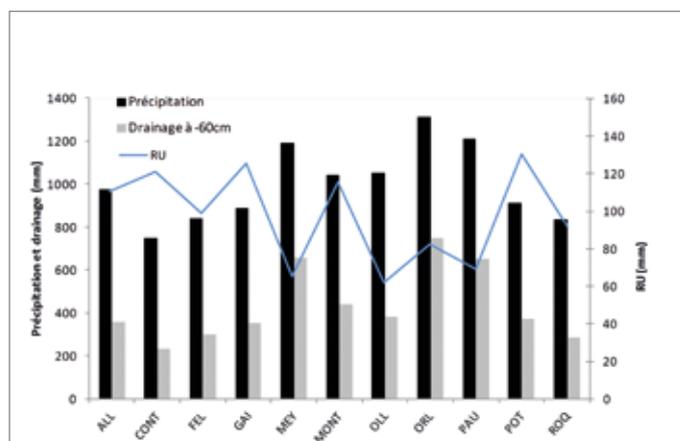


Fig. 6 : moyennes annuelles des précipitations et drainage à -60 cm pour la période 2013-2014 (axe de gauche) et réserve utile (axe de droite), pour les 11 sites instrumentés du réseau

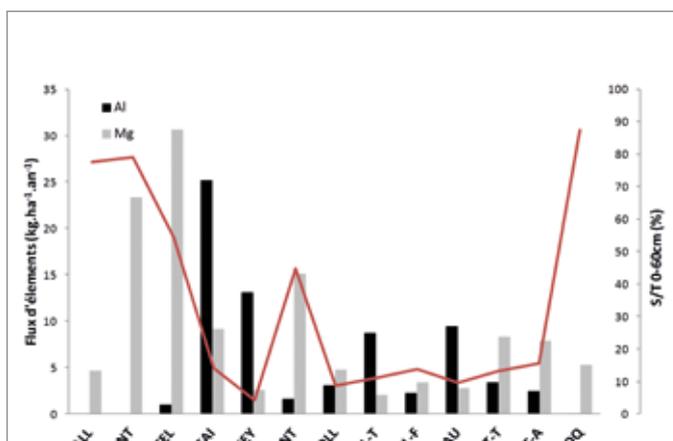


Figure 7 : pertes annuelles en Mg et Al par drainage à -60 cm, calculées sur la période 2013-2014, pour les 11 sites instrumentés du réseau. Le taux de saturation (S/T) moyen sur l'horizon 0-60 cm est également représenté (courbe rouge).

Références

Augusto L., 1999. Étude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimiques et la végétation de sols acides. Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I. Champenoux : INRA Nancy, 90 p. + annexes

Andrianarisoa K.S., Zeller B., Poly F., Siegenfuhr H., Bienaimé S., Ranger J., Dambrine É., 2010. Control of nitrification by tree species in a common garden experiment. *Ecosystems*, vol. 13 pp.1171-1187

Bloch M., 2013. Établissement du bilan hydrique dans le réseau d'étude des effets du Douglas sur les sols. Rapport 4^e année Esitpa Rouen.

Bonneau M., 1977. Modification de fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs. CR Fin d'étude contrat financé par la DGRST Document de la Station de Recherche sur les sols forestiers et la Fertilisation. INRA Champenoux 88p.

Jussy J.H., Colin-Belgrand M., Ranger J., 2000. Production and root uptake of mineral nitrogen in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Beaujolais Mounds. *For. Ecol. Manage.* vol. 128 (3) pp. 197-209

Marques R., Ranger J., Villette S., Granier A., 1997. Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaujolais Mounds (France). 2 : Quantitative approach. *For. Ecol. Manage.* vol. 92 (1-3) pp. 167-197

Ponette Q., Ranger J., Ottorini J.M., Ulrich E., 2001. Aboveground biomass and nutrient content of five Douglas-fir stands in France. *For. Ecol. Manage.* vol. 142 (1-3) pp. 109-127

Ranger J., Bonneau M., 1984. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. I. Le cycle biologique en forêt. *Rev. for. fr.* vol. 36 (2) pp. 93-112

Ranger J., Turpault M.P., 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *For. Ecol. Manage.* vol. 122 (1-2) pp. 139-154

Ranger J., Marques R., Colin-Belgrand M., Flammang N., Gelhaye D., 1995. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. *For. Ecol. Manage.* vol. 72 (2-3) pp. 167-183

Sicard C., Saint-André L., Gelhaye D., Ranger J., 2005. Effect of initial fertilisation on biomass and nutrient content of Norway spruce and Douglas-fir plantations at the same site. *Tree* vol. 20 (2) pp. 229-246

Siegenfuhr H., 2008. Étude de l'impact de la coupe à blanc d'un peuplement sur la minéralisation et la nitrification de l'azote dans le sol et de l'importance des pluiolessivats dans le cycle azoté. Master 1 Université Lorraine

Zeller B., Recous S., Kunze M., Moukoui J., Colin-Belgrand M., Bienaimé S., Ranger J., Dambrine É., 2007. Influence of tree species on gross and net N transformations in forest soils. *Ann. For. Sci.* Vol. 64 (2) pp. 151-158



Introduction des résines échangeuses d'ions dans le sol