



**ÉCOLOGIE VÉGÉTALE
ET MICROBIENNE**

Département Biologie,
Écologie, Évolution

Professeur M. CARNOL

Plan quinquennal de Recherches forestières 2019-2024

Subvention 01/07/2021-30/06/2022

Entre le Service public de Wallonie et l'Université de Liège

**ÉTUDE À LONG TERME DE LA BIOGÉOCHIMIE DES
ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS n°21/15119**

Action 0.5, Rapport d'activité, juin 2022

B. BOSMAN et M. CARNOL

Responsable scientifique : Prof. Monique Carnol
Équipe de recherche : Bernard Bosman, scientifique
André Piret, technicien
Assia Tahiri, technicienne

Table des matières

Table des matières	2
A. Fiche descriptive de l'action 0.5 « Étude à long terme de la biogéochimie des écosystèmes forestiers »	4
Préambule.....	4
A1. Justification et objectifs.....	4
A2. Méthode retenue	6
A3. Résultats attendus (par le COPIL initialement).....	6
A4. Durée et coûts (acceptés par le COPIL initialement)	6
A5. Calendrier 2021-2022 initial	6
A6. Personnel scientifique et technique si possible (ETP, Titre, H.mois effectif, H.mois effectif cumulé Plan 5al 2019-2024 et source de financement – càd volet du plan et ou subvention intégrée en cours de période 2019-2024).....	6
A7. Documents et/ou outils (livrables) à produire (volet ACRVF) - Support DNF et/ou DEMNA (Volet actions de recherche d'intérêt publiques suivies par le DNF et le DEMNA)	7
B. Rapport de l'action de recherche	7
B1. Introduction/contexte.....	7
B2. Brève description des activités de recherche et résultats (les activités de recherche peuvent être transformée en sous-actions correspondant aux tâches à réaliser/acceptées par le COPIL précédent).....	9
B2.1. Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et flux en éléments minéraux, et en carbone organique dans deux bassins versants forestiers.....	9
B2.2 Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers	14
B2.3. Gérer les bases de données	15
B2.4. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284.....	30
B2.5 Valoriser et disséminer les résultats des recherches	31
B3. ETP réel au jour de la présentation (justification en cas de modification).....	32
B4. Documents et/ou outils (livrables) produits et à produire modifiés le cas échéant et raisons.....	32
B5. Collaborations diverses (tous niveaux confondus).....	32
B6. Activités de communication et de publications (déclinées par type – scientifique, vulgarisation, conférences scientifiques, international, autres).....	33
B7. Perspectives et proposition de calendrier 2020-2024	33

B8. Autres références éventuellement citées (bibliographie utilisée le cas échéant)..... 35

A. Fiche descriptive de l'action 0.5 « Étude à long terme de la biogéochimie des écosystèmes forestiers »

Préambule

Cette action résulte de l'intégration d'une subvention annuelle de recherche préexistante au sein du volet 1 (thématiques d'intérêt) du Plan quinquennal. Ainsi, les recherches 2019-2020 étaient suivies par la Direction de la Recherche et du Développement du Département du Développement, de la Ruralité et des Cours d'Eau et du Bien-être animal du SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (« Étude à long terme de la biogéochimie des écosystèmes forestiers (2019) – D65-1405 »). Ces recherches 2019-20 ont été clôturées et le rapport final approuvé (Bosman et al., 2020).

Le programme 2020-2021 a été intégré dans l'action 0.5 du thème 1 « Évaluation des risques et gestion des forêts dans le cadre des changements globaux » et des axes stratégiques 1 et 2 du Plan quinquennal (« Maintenir et améliorer la capacité d'adaptation et la résilience des écosystèmes forestiers face aux changements globaux », « Disposer des données scientifiques régulièrement mises à jour permettant de fournir des informations à l'ensemble de la filière forêt-bois »). Le présent rapport présente les recherches réalisées dans la subvention 2021-22 (juillet 2021-juin 2022), ainsi qu'une proposition pour la suite des recherches en 2022-24.

A1. Justification et objectifs

Une partie des sites de mesures concernés par le projet ont été sélectionnés par l'AWAC dans le cadre de la mise en place d'un réseau de sites de surveillance représentatifs des écosystèmes (eaux de surface, habitats naturels non forestiers ou semi-naturels et écosystèmes forestiers) imposée par la nouvelle directive NEC (Art. 9 et annexe V de la directive NEC 2016/2284).

La base de données constituée au cours des subventions successives sur plus de 30 ans est un outil exceptionnel pour investiguer des processus lents (conséquences des changements climatiques, conséquences d'un changement des essences forestières, effets à long terme d'un amendement, effets chroniques de la pollution) et une source d'information unique pour la Wallonie. Les données sont utilisées dans le cadre du calcul de charges critiques en polluants acidifiants et eutrophisants (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance -PATLD ; directive EU 2001/81/CE abrogé par la directive 2016/2284 du 1/7/2018).

« La recherche à long terme sur les écosystèmes (LTER) est une composante essentielle des efforts mondiaux visant à mieux comprendre les écosystèmes et l'environnement sur lesquels nous dépendons » (LTER-Europe, <http://www.lter-europe.net/>). Les sites concernés par ce projet font partie de LTER-Europe (DEIMS.ID: <https://deims.org/450ecc48-b748-49da-8b33-7955854bda78>; DEIMS.ID: <https://deims.org/eb9a51f2-bed4-4c6a-8269-49b180708e2a>), au sein duquel un projet ESFRI infrastructure (« Integrated European Long-

Term Ecosystem, Critical Zone & Socio-Ecological Research Infrastructure (eLTER RI)) est développé.

Les résultats des recherches sont également utilisés dans le cadre de l'Etat de l'environnement wallon (Dépassement des charges critiques en polluants acidifiants et eutrophisants, Qualité biologique des sols).

Cette subvention récurrente annuelle s'inscrit dans les principes du Décret du 15 juillet 2008 relatif au code forestier (C.F.), dans le cadre des objectifs opérationnels de gestion forestière (Plan opérationnel DNF 2014-2019, P.O.) et dans les missions du plan quinquennal de recherche forestière (P.Q.) un complément à l'Accord cadre de recherche forestière et au suivi pédologique de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie en répondant à certaines attentes par le développement de connaissances au Laboratoire d'Ecologie végétale et microbienne de l'Université de Liège dans les domaines suivants :

- le maintien et l'amélioration des ressources forestières et leur contribution au cycle du carbone (C.F.) ;
- le maintien de la santé et de la vitalité des écosystèmes forestiers (C.F.) ;
- le maintien, la conservation et l'amélioration de la diversité biologique dans les écosystèmes forestiers (C.F.) ;
- le maintien et l'amélioration des fonctions de protection dans la gestion des bois et forêts, notamment pour le sol et l'eau (C.F.) ;
- le maintien d'un équilibre entre les peuplements résineux et les peuplements feuillus, et la promotion d'une forêt mélangée et d'âges multiples, adaptée aux changements climatiques et capable d'en atténuer certains effets (C.F.) ;
- le maintien et l'amélioration de la capacité d'adaptation des écosystèmes aux changements climatiques, en prenant en compte notamment la biodiversité et en veillant à augmenter la résilience des écosystèmes (... maintien de la qualité des sols ; ...l'étude de la dynamique de l'écosystème forestier) (art. 1 P.Q.) ;
- la limitation des risques prévisibles, tant au niveau de l'arbre que de l'écosystème ou des aspects économiques de la gestion forestière (... favoriser la diversité des peuplements, maintien de la fertilité des sols) (art. 2 P.Q.) ;
- le renforcement de la séquestration de carbone sur le long terme (mieux comprendre comment les écosystèmes forestiers et leur gestion contribuent à la séquestration de carbone à long terme) (art. 4 P.Q.) ;
- l'amélioration de la connaissance du patrimoine forestier (P.O.).

L'objectif général de la recherche est d'étudier l'équilibre nutritionnel à long terme de deux bassins versants, en mesurant les concentrations et les flux en éléments minéraux entrants (pluies, pluviollessivats) et sortants (solutions du sol, exutoires), ainsi que d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle de la qualité biologique des sols au sein de ces deux bassins versants. Les recherches concernent particulièrement l'effet des essences et des mesures de gestion sylvicole sur les activités microbiennes des sols et la biogéochimie de l'écosystème forestier.

A2. Méthode retenue

La structure du programme de recherche, dans la continuité des mesures commencées dans les subventions précédentes, est la suivante :

1. Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et les flux en éléments minéraux et en carbone organique dans deux bassins versants forestiers.
2. Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers
3. Gérer les bases de données
4. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284

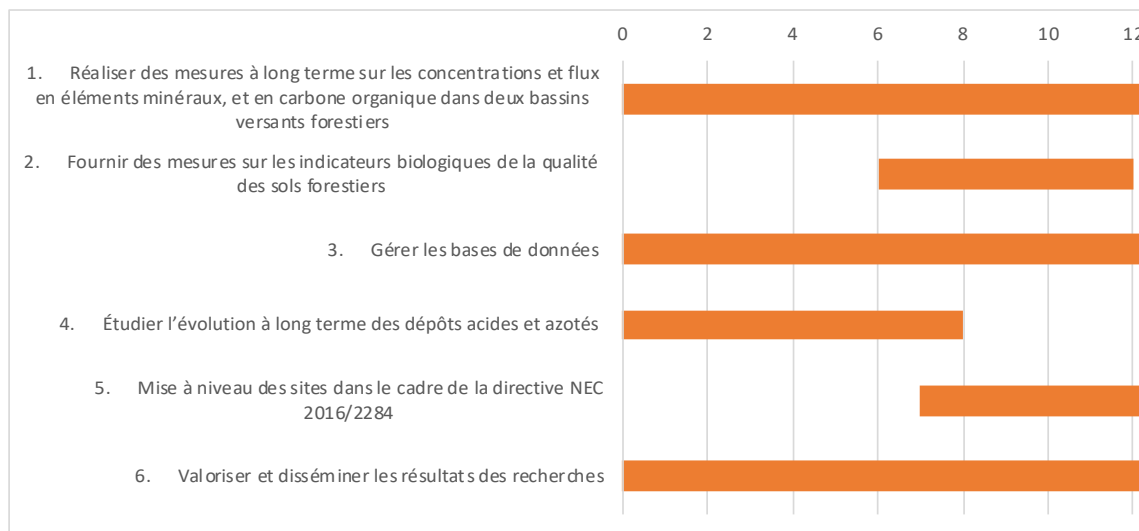
A3. Résultats attendus (par le COPIL initialement)

Na

A4. Durée et coûts (acceptés par le COPIL initialement)

Subvention de 12 MOIS (du 1er juillet 2021 au 30 juin 2022) ; 224595 euros

A5. Calendrier 2021-2022 initial



A6. Personnel scientifique et technique si possible (ETP, Titre, H.mois effectif, H.mois effectif cumulé Plan 5al 2019-2024 et source de

financement – càd volet du plan et ou subvention intégrée en cours de période 2019-2024)

2021-2022 (12 mois)

Nom	ETP	Titre	Financement (volet du plan)	H.mois effectif	H.mois effectif Cumulé5 ans
Bernard Bosman	100%	Lic.	DNF (volet 1)	12	/
André Piret	100%	Technicien	DNF (volet 1)	12	/
Assia Tahiri	100%	Technicienne	DNF (volet 1)	12	/

A7. Documents et/ou outils (livrables) à produire (volet ACRVF) - Support DNF et/ou DEMNA (Volet actions de recherche d'intérêt publiques suivies par le DNF et le DEMNA)

- Publications
 - Revues à impact local (Forêt wallonne)
 - Revues internationales
- Rapportage NEC
- Si besoin : chapitres 'État de l'environnement wallon'

B. Rapport de l'action de recherche

B1. Introduction/contexte

Nos forêts sont soumises à des stress dus à la pollution atmosphérique et aux changements globaux. Ainsi, les dépôts de polluants acides et azotés, combinés aux risques liés aux changements climatiques (réchauffement, sécheresses, pathogènes...) constituent une menace pour les nombreux services écosystémiques fournis par les forêts. Ces services, indispensables au bien-être de l'homme, servent des fonctions écologiques (cfr services de régulation : climat, séquestration du carbone, qualité de l'eau, maladies...), sociales (cfr services culturels : éducationnel, bienfaits récréatifs) et économiques (cfr services d'approvisionnement : nourriture, eau, bois, ...). Le maintien de la santé des forêts, passe ainsi par l'adaptation de la gestion forestière aux conditions climatiques nouvelles et à l'augmentation de la résilience de l'écosystème face aux stress. Cette augmentation de résilience peut être atteinte par une augmentation / le maintien de différents composants qui

déterminent la diversité, la qualité et la fertilité des écosystèmes forestiers. En particulier la biodiversité des espèces, y compris microbiennes, détermine la résilience de l'écosystème forestier aux conditions environnementales changeantes (Thompson et al., 2009).

Il apparaît donc indispensable de préserver la qualité des écosystèmes forestiers, tout en augmentant la biodiversité et en maintenant/augmentant la productivité forestière. Une prise de conscience des services écosystémiques (e.g. (Carnol and Verheyen, 2010; Carnol et al., 2014) fournis par les forêts a mené à l'adoption du principe de développement durable des forêts dans le Code forestier de Wallonie. Y sont inscrits notamment les principes de multifonctionnalité ('la coexistence harmonieuse de leurs fonctions économiques, écologiques et sociale'), de protection des sols et de biodiversité ('le maintien d'un équilibre entre les peuplements résineux et les peuplements feuillus, et la promotion d'une forêt mélangée et d'âges multiples, adaptée aux changements climatiques et capable d'en atténuer certains effets'). Par ailleurs, l'accord-cadre de recherche forestière, le plan quinquennal de recherche forestière et la mise en place de l'« Observatoire pour la santé des forêts » témoignent d'une réelle volonté d'améliorer nos connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème forestier wallon et de mettre en place des outils de surveillance.

Des programmes de surveillance et des recherches écosystémiques à long terme s'avèrent essentiels dans l'analyse des changements dans l'environnement. Ils permettent d'acquérir une compréhension détaillée des processus qui contrôlent le fonctionnement des écosystèmes et de démêler les changements dus aux facteurs naturels et anthropiques (Haase et al., 2016 ; Vanderbilt and Gaiser, 2017). Un programme de surveillance peut être utilisé à la fois pour évaluer p.ex. l'impact d'instruments politiques dans la gestion sylvicole, et comme cadre de réalisation de projets de recherche à court-moyen terme (Lindenmayer and Likens, 2010a, 2010b).

Dans l'écosystème forestier, la nutrition des plantes, et par conséquent la productivité, dépend essentiellement des cycles biogéochimiques, qui peuvent être définis comme 'la circulation permanente des éléments minéraux entre compartiments de l'écosystème, les végétaux et les horizons des sols prospectés par les racines (Ranger et al., 1995). Les cycles sont caractérisés par des relations réciproques plante-sol. Les (micro-)organismes du sol jouent un rôle essentiel dans les cycles biologiques, via leurs activités dans la décomposition de la matière organique, contrôlant ainsi la disponibilité en éléments nutritifs. Par ailleurs, la végétation influence les cycles biologiques via la restitution de la litière au sol (Carnol and Bazgir, 2013) et son influence sur les processus dans la rhizosphère (Augusto et al., 2002) par son impact sur les apports atmosphériques par les pluviocessivats. La qualité du sol et les processus (micro-)biologiques qui s'y déroulent apparaissent donc comme éléments clés pour le fonctionnement et la fertilité de l'écosystème forestier. La fertilité/qualité des sols est donc un indicateur clé pour la gestion durable de l'écosystème forestier (Nambiar, 1996), car elle est liée en grande partie à la productivité et à l'état de santé des arbres (couverts par l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts).

Ainsi, le Laboratoire d'écologie végétale et microbienne propose à ce niveau une recherche alliant une surveillance stratégique ('Strategic monitoring') de l'écosystème forestier

(pollution acide et azotée, équilibre nutritionnel de l'écosystème, biogéochimie en bassin versant), permettant la détection de changements à long terme, avec une recherche scientifique liée à cette surveillance et axée principalement sur le fonctionnement biologique des sols forestiers ('Research-related monitoring'), améliorant nos connaissances sur le fonctionnement global de l'écosystème et fournissant une base pour la prise de décisions stratégiques. Ces deux piliers (amélioration des connaissances et informations stratégiques) constituent avec un troisième (inventaire opérationnel-inventaire forestier national) la base du nouveau système de surveillance de la santé de la forêt en Suède (Wulff et al., 2011).

B2. Brève description des activités de recherche et résultats (les activités de recherche peuvent être transformée en sous-actions correspondant aux tâches à réaliser/acceptées par le COPIL précédent)

B2.1. Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et flux en éléments minéraux, et en carbone organique dans deux bassins versants forestiers

Les recherches sont effectuées dans deux écosystèmes forestiers situés dans l'Hertogenwald (Ardenne occidentale). Ces deux écosystèmes constituent des bassins versants d'environ. 80 ha, c'est-à-dire 'une portion de territoire délimitée par des lignes de crête, dont les eaux alimentent un exutoire commun' ; ici un cours d'eau. De nombreuses études ont montré que l'approche « bassin versant de petite dimension » était particulièrement appropriée pour l'étude de la dynamique des éléments nutritifs (Hornbeck et al., 1986; Martin and Harr, 1989; Likens et al., 1995). En particulier, les budgets entrées-sorties sont reconnus comme indicateur clé d'une variation dans la fertilité du sol et d'une gestion forestière durable (Ranger and Turpault, 1999).

Le laboratoire d'Écologie végétale et microbienne de l'ULiège étudie l'évolution des concentrations et des flux en éléments minéraux et en carbone organique dans les pluies, les pluviollessivats, la solution du sol et à l'exutoire des bassins versants de la Robinette et de Waroneu depuis 1990 (i.e. (Carnol et al., 1999; Bosman and Carnol, 2000; Bosman et al., 2001).

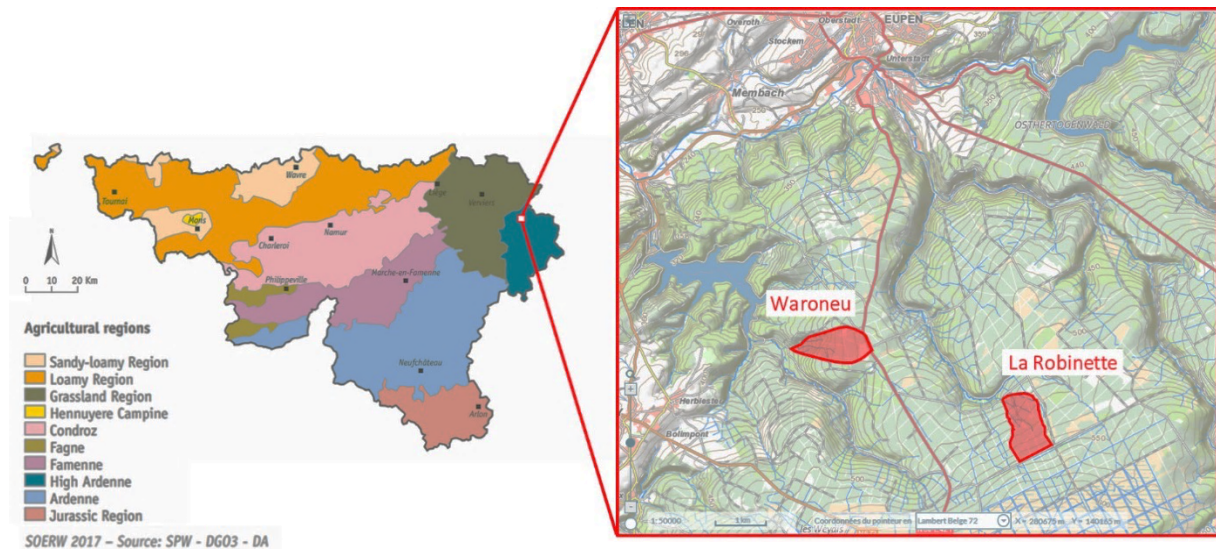


Fig. 1 : localisation des bassins versants de La Robinette et de Waroneu parmi les régions agricoles de Wallonie.

Ces écosystèmes, initialement peuplés majoritairement de conifères (Robinette : 99%, Waroneu : 60%) ont subi diverses actions de gestion sylvicole : amendement (Waroneu, 1992), coupe à blanc (Robinette 22 ha, 1996), reboisement en mélange de feuillus (Robinette, 1998). Diverses recherches ponctuelles y ont été menées en parallèle au suivi temporel : décomposition des litières, impact des espèces d'arbres sur le sol (acidité, éléments nutritifs, processus microbiens) (Bazgir and Carnol, 2011; Carnol and Bazgir, 2013). Depuis 2013, des placettes d'étude intensives (6 par bassin versant) ont été établies sur base des unités végétation-sol prédominantes. Ces placettes sont équipées de systèmes de récolte des pluviollessivats et de la solution du sol, et échantillonnées régulièrement pour mesurer des indicateurs biologiques de la qualité des sols (Bosman and Carnol, 2015; Ratcliffe et al., 2018). Ces deux sites peuvent ainsi être considérés comme des sites-ateliers, à l'image des sites-ateliers en France (<http://www2.gip-ecofor.org/f-ore-t/index.php>).

La disposition des placettes au sein des deux bassins versants est représentée dans les figures suivantes (fig 2, fig 3).

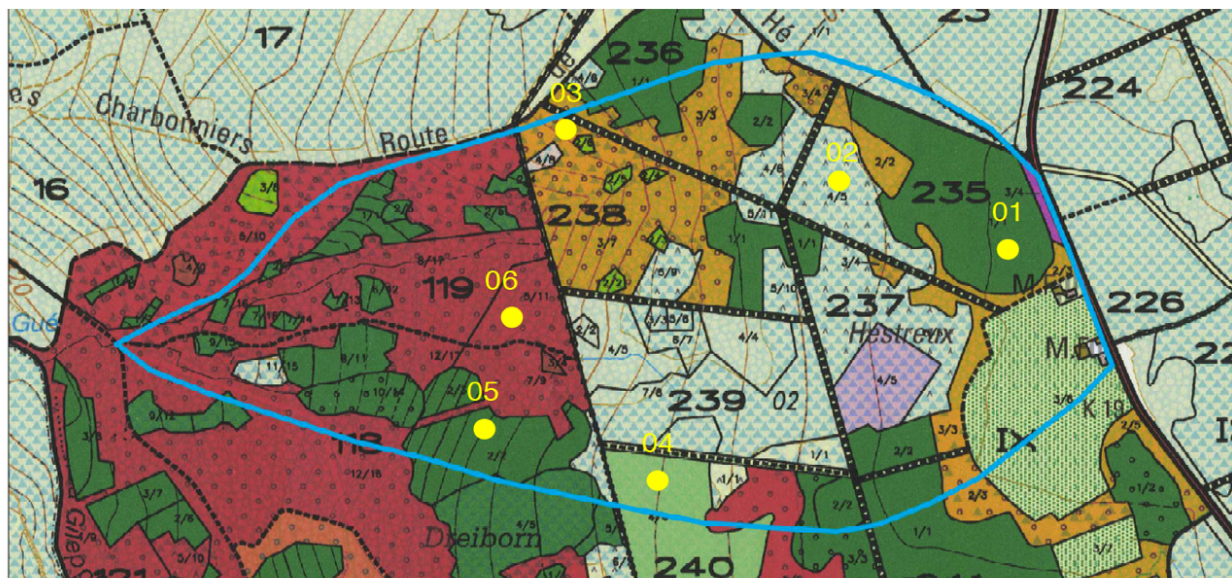


Fig. 2 : disposition des 6 placettes du bassin versant de Waroneu ;
 01 : épicéas adultes (1906) sur sol hydromorphe,
 02 : essences en mélange sur sol hydromorphe ; entre 2013 et 2017 à découvert,
 03 : chênes (1885) sur sol brun acide,
 04 : épicéas jeunes (1995) sur sol hydromorphe,
 05 : épicéas adultes (1935) sur sol brun acide ; désinstallée en 2020,
 06 : hêtres (1860) sur sol brun acide en pente.

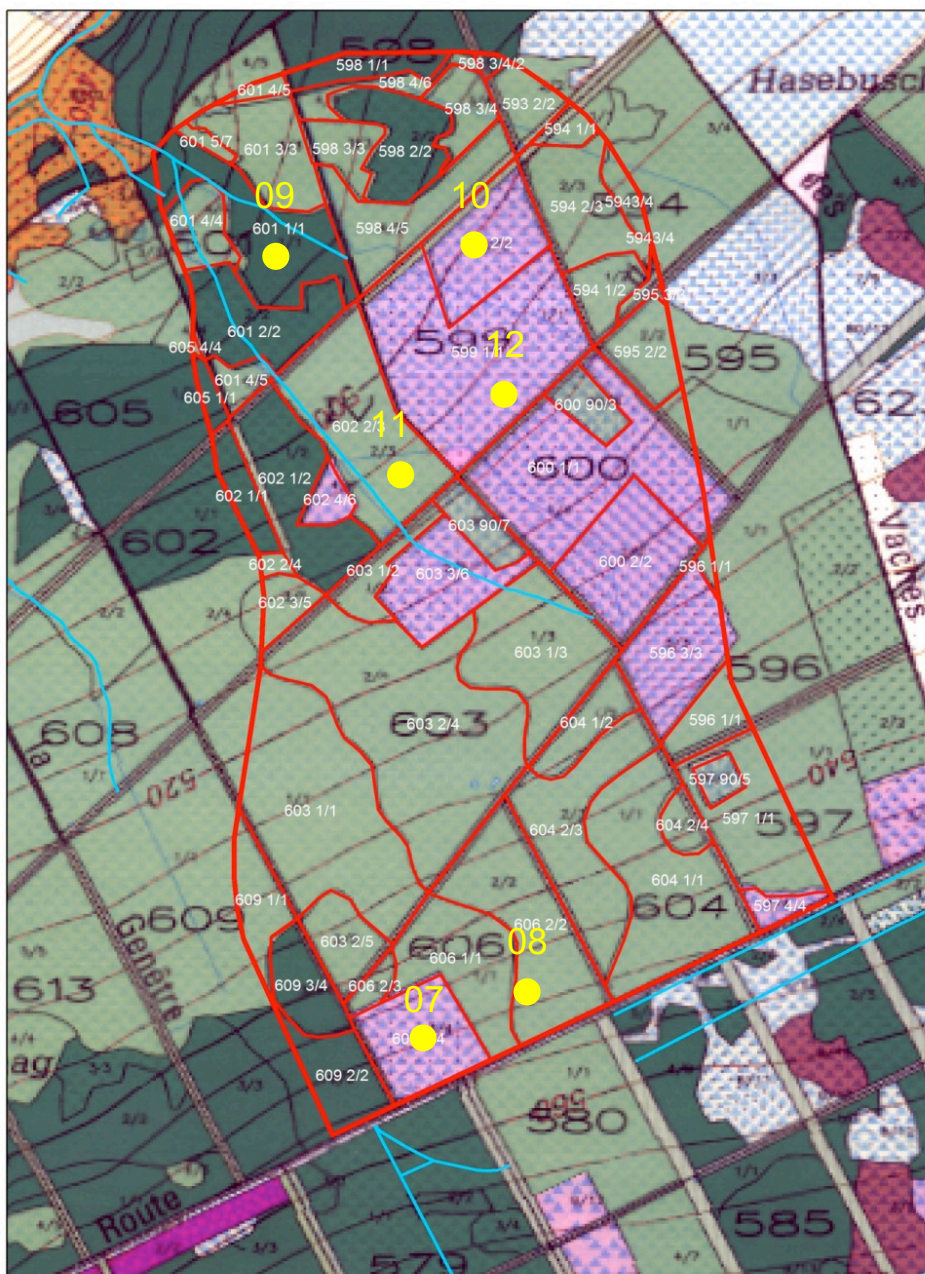


Fig. 3 : disposition des 6 placettes du bassin versant de la Robinette ;
 07 : parcelle 1 essences en mélange sur sol hydromorphe (1999),
 08 : épicéas (1998) sur sol hydromorphe,
 09 : épicéas adultes (1930) sur sol brun acide,
 10 : parcelle 4 essences en mélange sur sol brun acide (1999),
 11 : mélange épicéas de sitkas / épicéas (1985) sur sol hydromorphe,
 12 : découvert sur sol hydromorphe

Douze placettes d'études intensives ont été installées, avec chacune 6 stations pluviométriques et 8 bougies poreuses (récolte de la solution du sol). Ces placettes sont réparties dans les deux bassins versants (6 placettes par bassin) en fonction des combinaisons 'sol-végétation' prédominants dans chaque bassin versant. Une placette (RI pour Robinette Intensive) sous épicéas installée auparavant (depuis 1990) à La Robinette a été maintenue et

mis à jour. La solution du sol est extraite à l'aide d'une bougie poreuse en téflon (PRENART soil water sampler, Danemark) reliée à un récipient en verre fumé dans lequel une dépression de -65 kPa (-650 mbar) est appliquée (8 répétitions par placette). Tous les 15 jours la bouteille est dépressurisée, et l'eau du sol est récoltée tous les mois. La pluie à découvert et les pluviolessivats sont récoltés au moyen de stations pluviométriques (« pluviomètre ») constituées de 5 entonnoirs ("funnel shaped raingauges", (Rodda et al., 1985) : un entonnoir protégé par un morceau de tissu synthétique à large maille est fixé sur un piquet de bois de 40 cm de haut, et raccordé par un tuyau à une bouteille de PVC glissée dans le sol, le tuyau et la bouteille sont extérieurement peints en noir afin d'éviter le développement d'algues. Lors des récoltes, les contenus des 5 entonnoirs d'une même station sont réunis afin de constituer un seul échantillon (6 répétitions par placette). En hiver, les stations pluviométriques sont remplacées par des seaux permettant la récolte des précipitations sous forme de neige (Likens et al., 1995). Les échantillons sont récoltés une fois par mois.

Cette année, les installations de collecte ont été vérifiées et les entonnoirs, tubes, bouteilles et piquets ont été intégralement remplacés. Des adaptations ont été effectuées, en fonction des besoins de la directive de la directive NEC 2016/2284 et des sondes de température du sol ont été installées dans les placettes W03 (Chênes de Waroneu), R07 et R10 (essences en mélange de La Robinette). Une sonde a été installée pour mesurer la température de l'eau à l'exutoire de La Robinette.

Les eaux de sortie des deux bassins versants (exutoires) sont échantillonnées à l'aide d'un échantillonneur automatique (voir ci-dessous).

Les échantillons récoltés se composent donc de (échantillonnage mensuel) :

- 2 Placettes 'Pluies à découvert' (1 Waroneu, 1 Robinette) :
 - 6 pluviomètres par placette ;
- 13 Placettes d'études intensives (6 Waroneu, 7 Robinette) :
 - Pluies à découvert ou pluviolessivats (selon la placette) : 6 pluviomètres par placette
 - Solution du sol : 8 bougies poreuses par placette
- Exutoires (Robinette et Waroneu) :
 - Échantillonnage journalier à l'aide d'un échantillonneur automatique et mesure du débit en continu. Les analyses chimiques sont réalisées sur des échantillons semi-mensuels (2 échantillons/mois) reconstitués à partir des échantillons journaliers et sur base des masses d'eau journalières.

De plus, la hauteur, la circonférence à 1,30 mètres (c1,3), ainsi que la densité des arbres dont la hauteur est supérieure à 2 mètres sont mesurées dans les placettes d'étude intensive (1 an sur 2).

Les récoltes et analyses chimiques des échantillons ont été poursuivies. La station W05 (épicéas adultes à Waroneu) a été démontée en 2020. En effet, à la suite d'une succession de coupes d'arbres scolytés, la parcelle est maintenant à nu. En fonction de l'évolution sylvicole de cette parcelle nous pourrions, éventuellement, la réinstaller dans le futur.

Après les pluies diluviennes de la mi-juillet 2021, des travaux importants ont été réalisés en urgence sur les deux exutoires des bassins versants. Grâce à l'excellente collaboration avec les services du DNF, les accès aux différents chemins menant aux sites ont été rapidement rétablis et les débris qui obstruaient les exutoires dégagés. Durant cette année toutes les parcelles ont été remises à neuf avec des nouveaux pluviomètres (piquets, entonnoirs, tubes et bouteilles).

Deux clôtures électriques ont dû être installées : une autour de la parcelle R11 (Robinette, essences en mélange) et une autre autour de la parcelle W03 (Waroneu, chênes) pour les protéger des sangliers.

B2.2 Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers

En automne 2020, nous avons réalisé un échantillonnage pour mesurer des indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers dans des sites sélectionnés sur base de discussions avec l'équipe de UCLouvain (Quentin Ponette et Hughes Titeux). Ils avaient réalisé des échantillonnages de sols profonds sur 89 sites et défini 5 classes de risque pour la nutrition en Mg et P. Parmi ces sites, nous en avons sélectionné 30, une moitié sont des hêtraies, l'autre des pessières, et 10 sont dans la classe 1 'risque très faible', 10 dans la classe 3 'risque modéré' et 10 dans la classe 5 'risque très élevé'.

Les trente sites ont été échantillonnés en novembre 2020, majoritairement dans les Ardennes. Ces sites sont soit des placettes de l'Inventaire Permanent Forestier de la Région Wallonne (25) soit des placettes ICP Forest (5). Dans chaque placette deux échantillons composites, un de l'horizon organique et un de l'horizon minéral 0-10 cm, issus de 6 carottages (1 au centre de la placette, 1 à 1 mètre vers le Nord, 1 à 2 mètres vers l'Est, 1 à 3 mètres vers le Sud, 1 à 4 mètres vers l'Ouest et le dernier à 5 mètres vers le Nord) avec une tarière de 8 cm de diamètre ont été prélevés. Notons que la participation d'un étudiant, qui réalise son travail de fin d'études, nous a permis d'échantillonner et d'analyser deux horizons du sol. Une description détaillée de ces horizons a été réalisée *in situ*.

Pour les 60 échantillons les analyses suivantes ont été réalisées :

- Le $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ et pH_{KCl}
- Le potentiel de respiration
- La biomasse microbienne en C/N/P
- La minéralisation nette de l'azote
- Le carbone soluble (extraction à l'eau froide puis chaude)
- MSIR (multiple substrate induced respiration) à l'aide de Microresp
- Cations échangeables (BaCl_2)

Une étroite collaboration est prévue avec l'équipe de Q. Ponette pour la mise en commun des données, l'interprétation et la publication des résultats. Dans le rapport précédent nous avons présenté une première analyses des données. L'analyse plus approfondie est en cours.

Des sous-échantillons ont été stockés pour des analyses complémentaires éventuelles (voir « perspectives »).

Un nouvel échantillonnage de sol est prévu à l'automne de cette année. Le site de Gedinne (FORBIO, effet de la diversité des essences) a été retenu. Ce 16 août une visite du site avec Quentin Ponette a eu lieu pour planifier les modalités de l'échantillonnage.

B2.3. Gérer les bases de données

Dans la subvention précédente, un travail conséquent a été fourni pour répertorier et documenter l'historique des mesures, améliorer le système de gestion des bases de données, afin d'assurer leur pérennité, accessibilité et la disponibilité des métadonnées. La réalisation d'une publication sous forme de 'datapaper' est bien avancée et en cours de finalisation. Un site internet dédié sera créé.

La base de données est à jour pour les données acquises depuis 1990 jusque fin 2020. Les données acquises en 2021 et 2022 seront intégrées rapidement, une procédure semi-automatique a été testée, amendée et validée pour faciliter cette opération. La fusion des deux bases de données (avant et après 2014) a été réalisée et, actuellement, la base de données unique comporte 1.564.600 entrées.

Un travail similaire pour les données concernant les analyses de sol sera entamé.

L'analyse de l'évolution à long terme des dépôts en substances acidifiantes et eutrophisantes, ainsi que le calcul des budgets entrées – sorties dans les deux bassins versants sont prévus cette année. L'analyse statistique des séries temporelles est en cours et nous disposons déjà de graphiques qui montrent l'évolution au cours du temps des différents éléments analysés pour les collecteurs suivants : pluies à découvert, pluviolessivats et eaux à l'exutoire. Ces graphiques montrent l'avancement des travaux et illustrent des tendances qui seront vérifiées et quantifiées par des analyses statistiques. Ces analyses étudieront aussi les effets à long termes des interventions sylvicoles majeures mises en œuvre dans les deux bassins versants : un amendement calcaro-magnésien (3T /ha de dolomite) de Waroneu en 1992 et une coupe à blanc de 22 ha d'épicéas (qui avait été précédée d'importants chablis) en 1996 suivie d'une replantation avec des essences feuillues en 1998-1999 dans le bassin versant de La Robinette.

Dépôts acidifiants et eutrophisants :

- Dans les pluies à découvert et les eaux aux exutoires

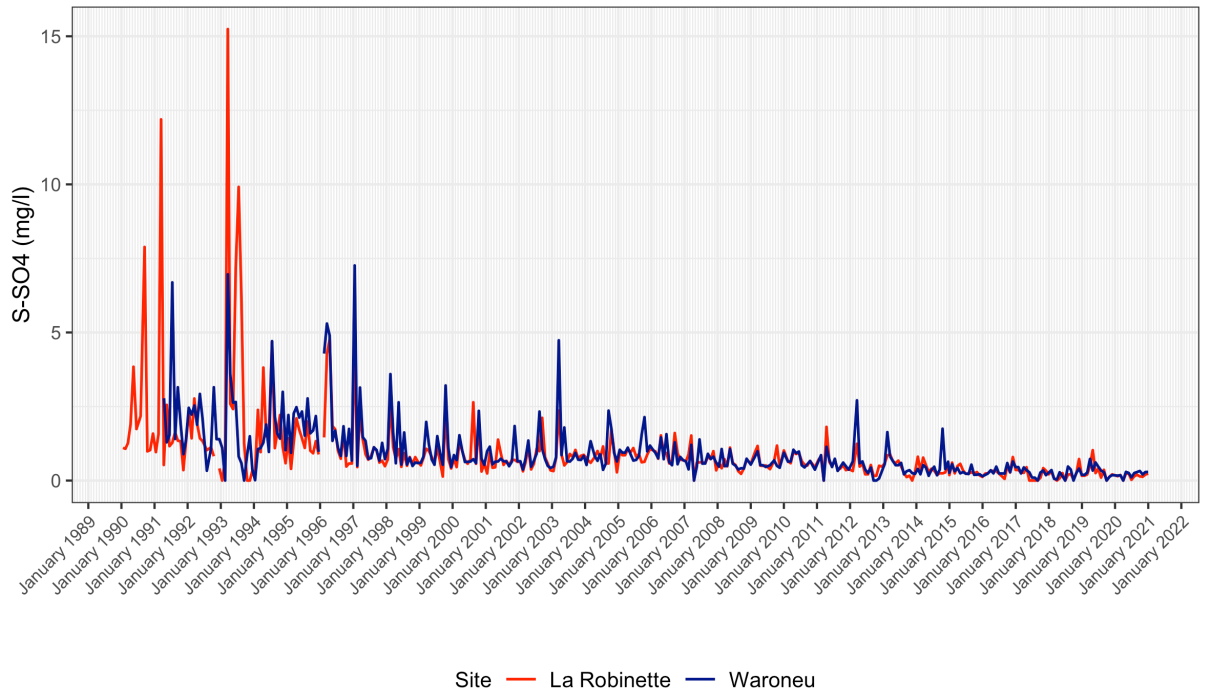


Figure 4 : concentrations en sulfates exprimées en S-SO₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

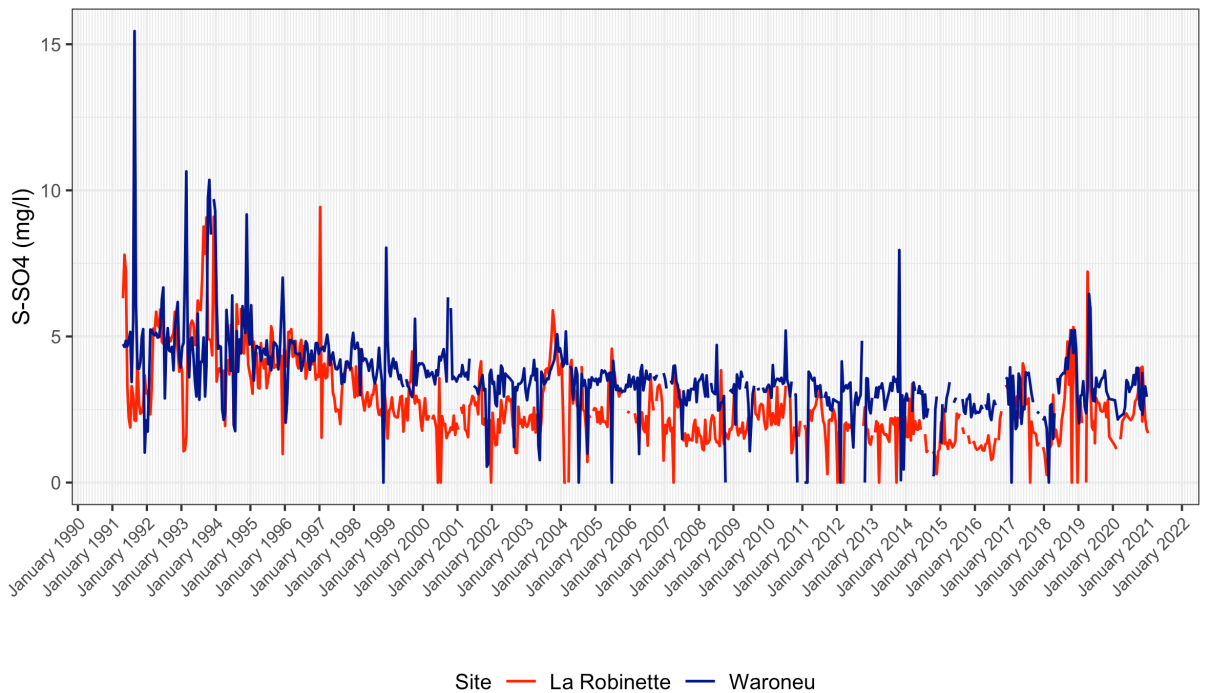


Figure 5 : concentrations en sulfates exprimées en S-SO₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Nous pouvons observer une diminution continue des concentrations en sulfates pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découverts (entrées) dans les deux bassins versants (fig. 4) qui se traduit par une diminution des concentrations en sulfates dans les eaux des deux exutoires (sorties) (fi. 5). A partir de 1997, les concentrations sont plus faibles dans les eaux de l'exutoire de La Robinette, potentiellement une conséquence de la coupe à blanc.

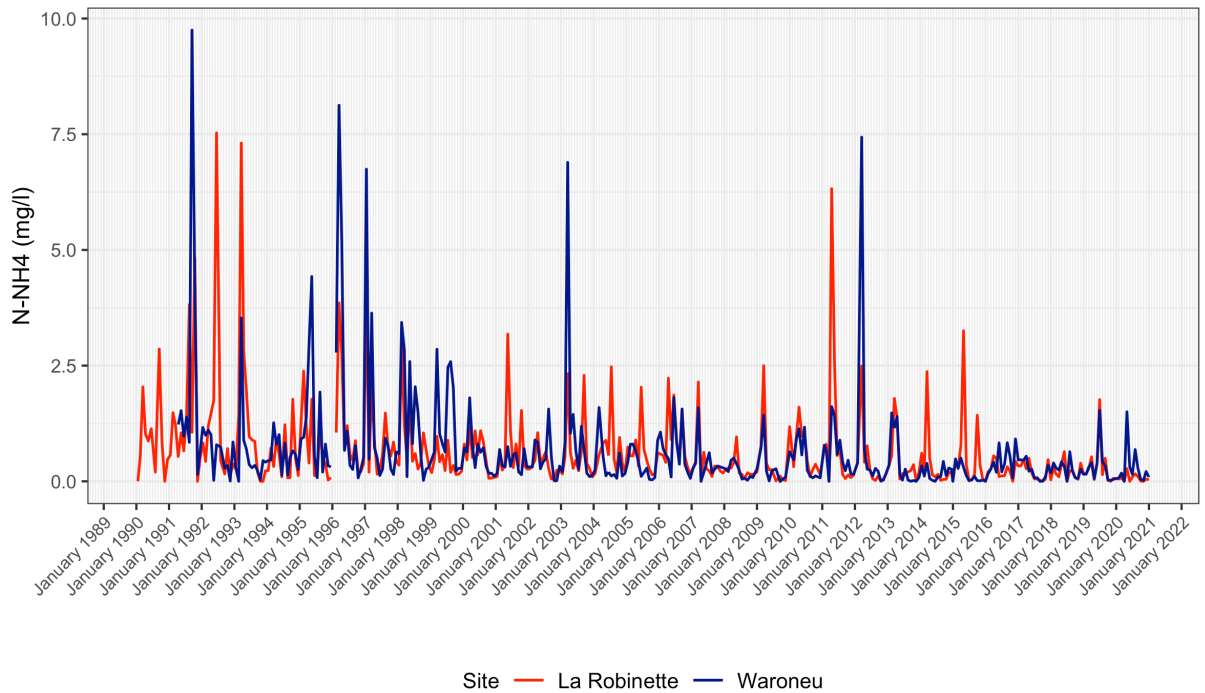


Figure 6 : concentrations en ammonium exprimées en N-NH₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

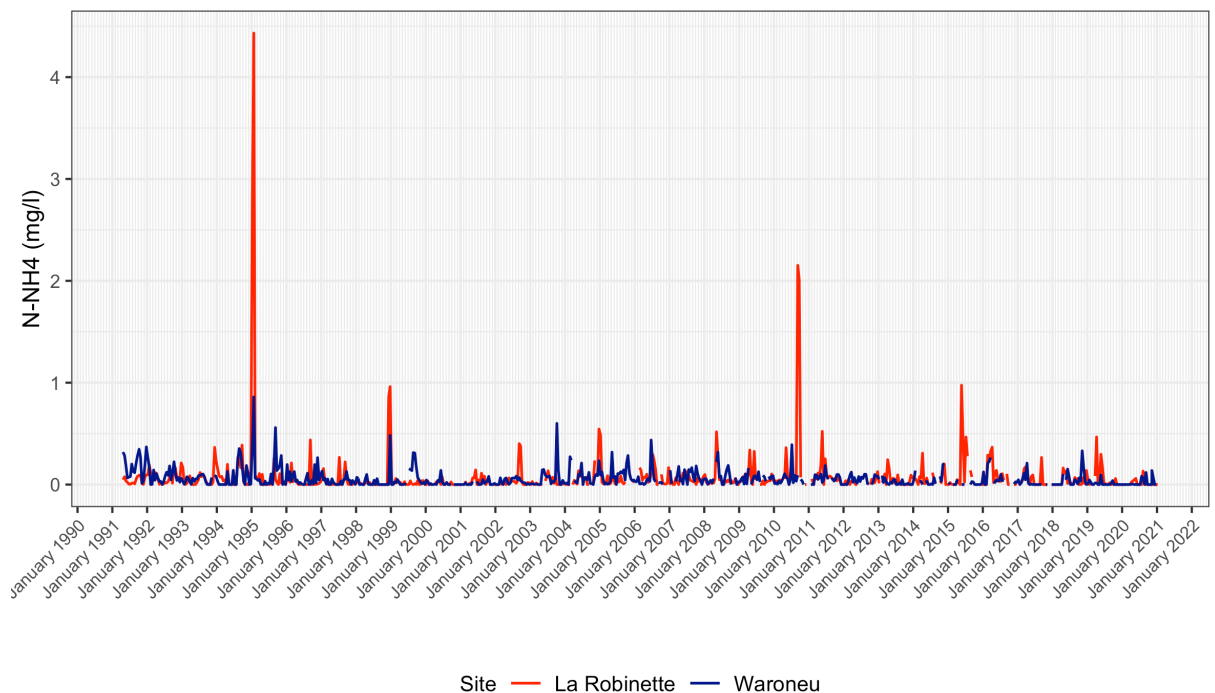


Figure 7 : concentrations en ammonium exprimées en $N-NH_4$ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Les concentrations en ammonium pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découverts (fig. 6) semblent stables au cours de ces trente dernières années et similaires dans les deux bassins versants. Elles sont très faibles dans les eaux des deux exutoires (fi. 7).

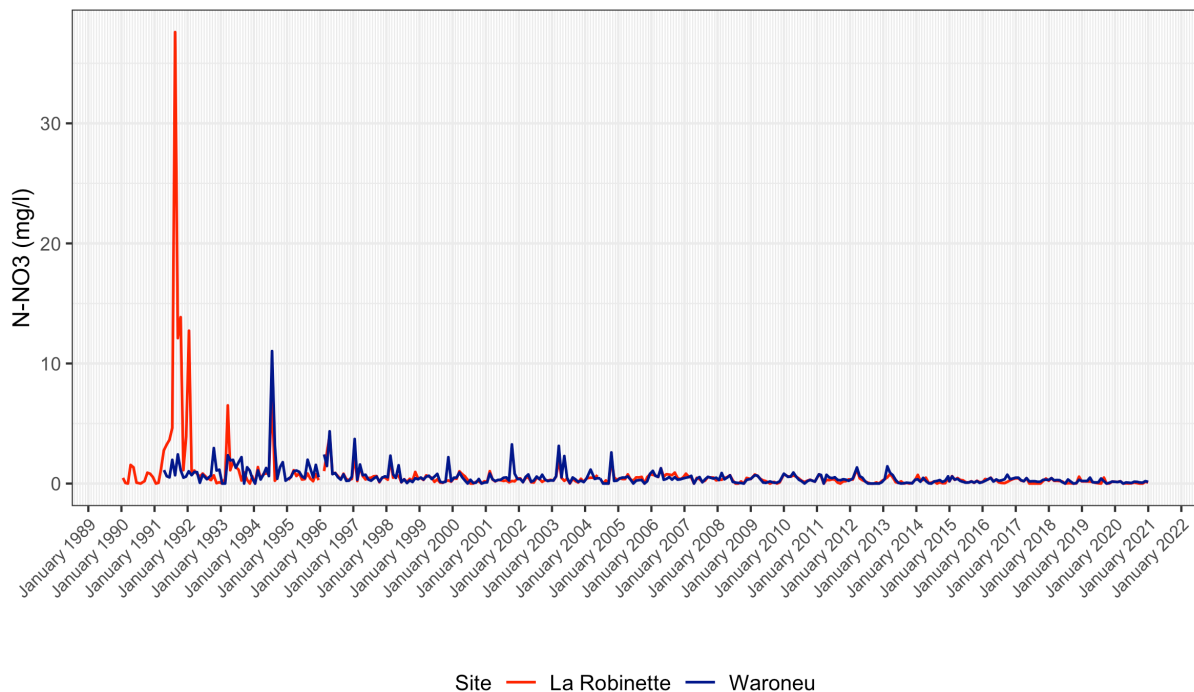


Figure 8 : concentrations en nitrates exprimées en $N-NO_3$ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

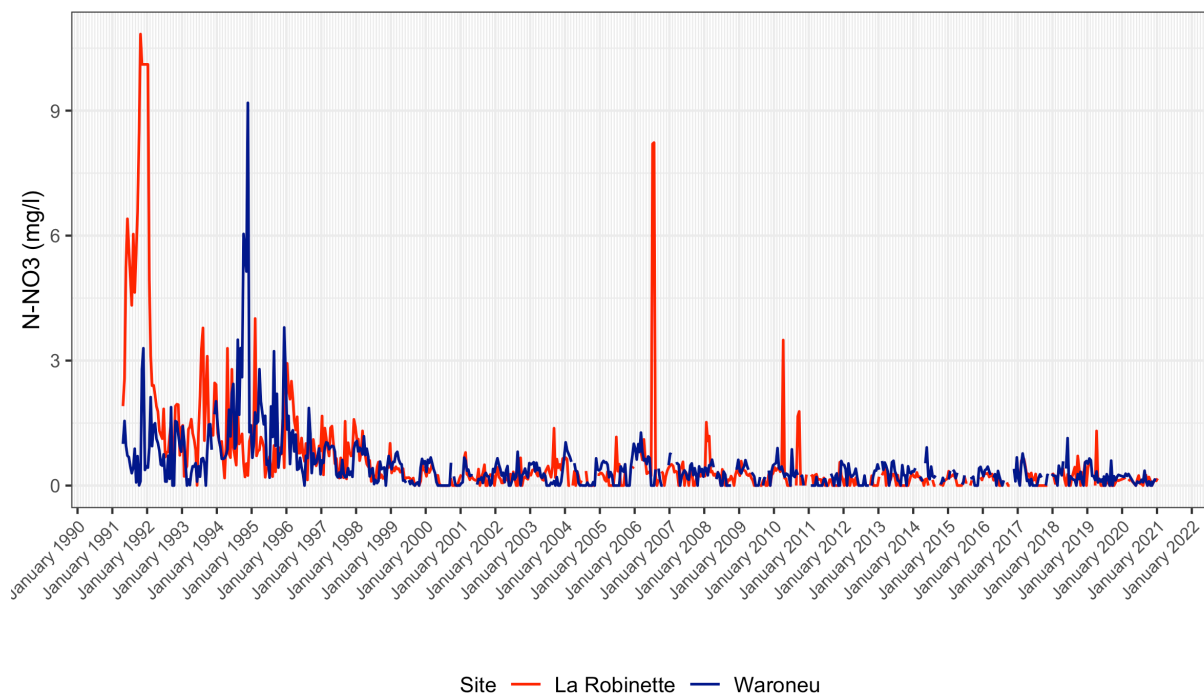


Figure 9 : concentrations en nitrates exprimées en N-NO₃ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Les concentrations en nitrates pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découverts (fig. 8) et les eaux des exutoires (fi. 9) diminuent dans les deux bassins versants. Une attention particulière sera portée dans les analyses statistiques sur une éventuelle augmentation des concentrations en nitrates dans les années qui ont suivi l'amendement de Waroneu (en 1992).

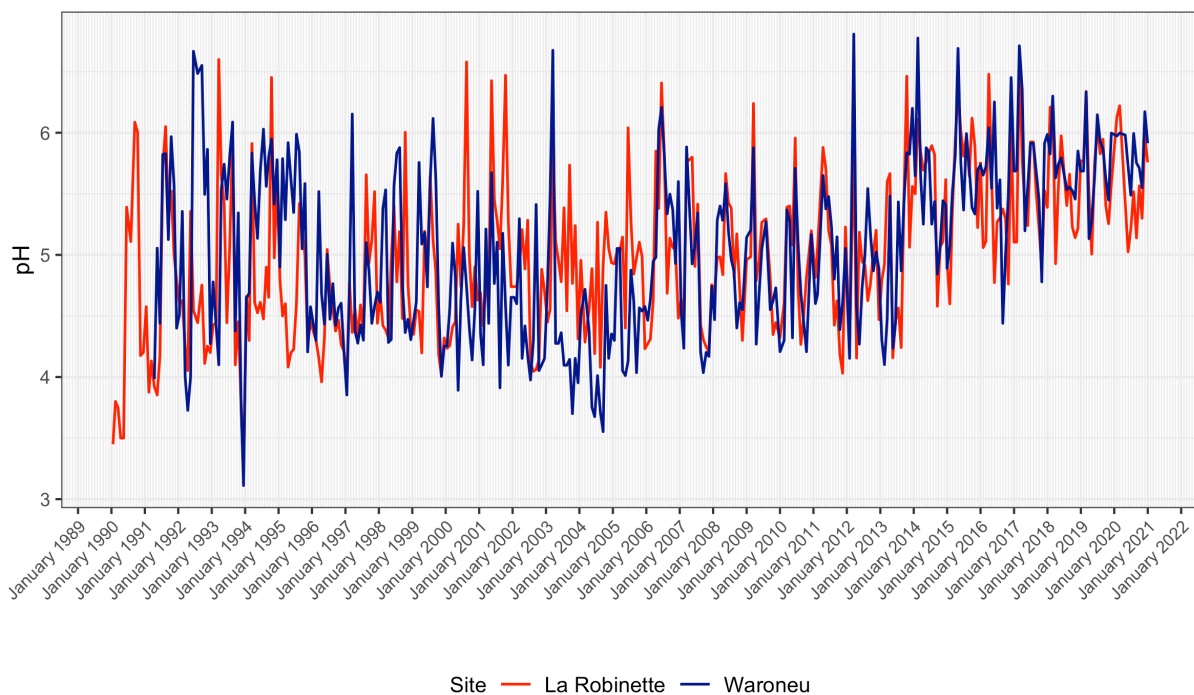


Figure 10 : valeurs de pH pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

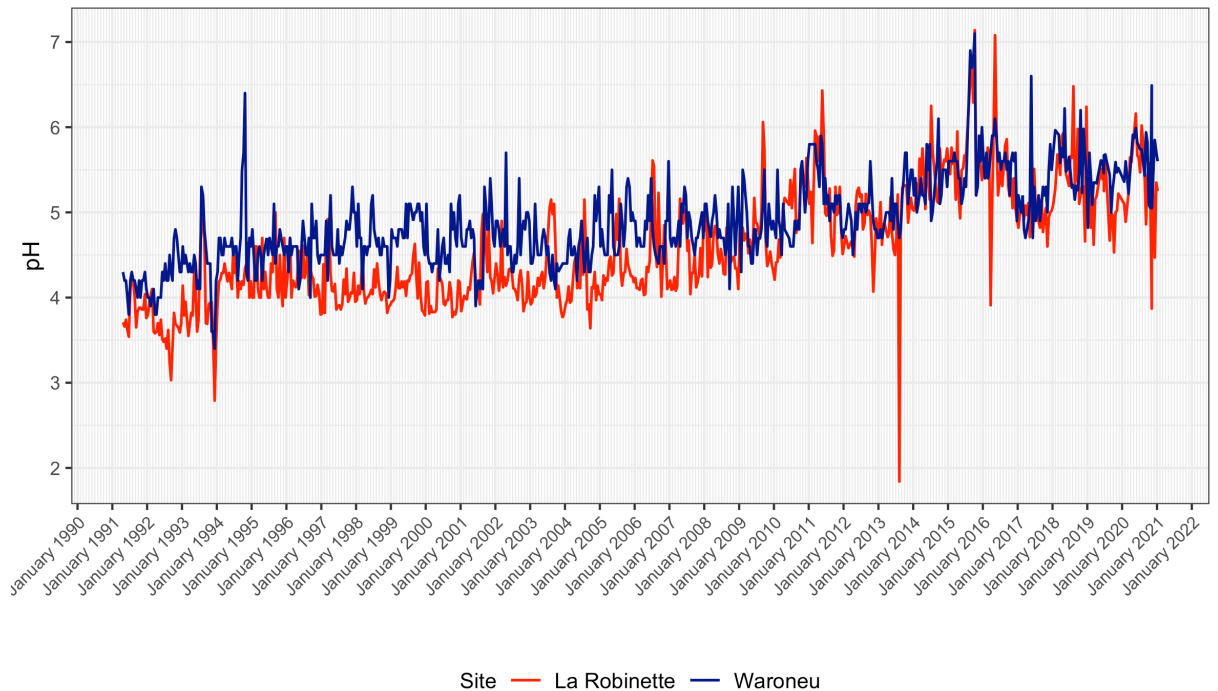


Figure 11 : valeurs de pH pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Le pH dans les pluies à découverts (fig. 10) et les eaux des exutoires (fig. 11) augmente dans les deux bassins versants ; le gain semble de plus d'une unité et sera précisé par les analyses statistiques. Jusqu'en 2009-2010, le pH dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu était supérieur à celui des eaux de La Robinette ; ensuite, les mesures de pH pour les deux bassins versants sont semblables. Une combinaison de facteurs peut expliquer cette augmentation des valeurs de pH : d'une part la réduction des dépôts acidifiants en sulfates pour les deux bassins versants, d'autre part pour Waroneu l'application de l'amendement et pour La Robinette la diminution drastique de la surface de la pessière.

- Dans les pluviolessivats

En 2013, nous avons réinstallé de nouvelles placettes qui ont été sélectionnées à partir des essences présentes dans les deux bassins versants mais aussi des classes d'âge des arbres et des types de sol. Les données des graphiques suivants sont issues de ces nouvelles placettes et couvrent la période entre 2013 et fin 2020.

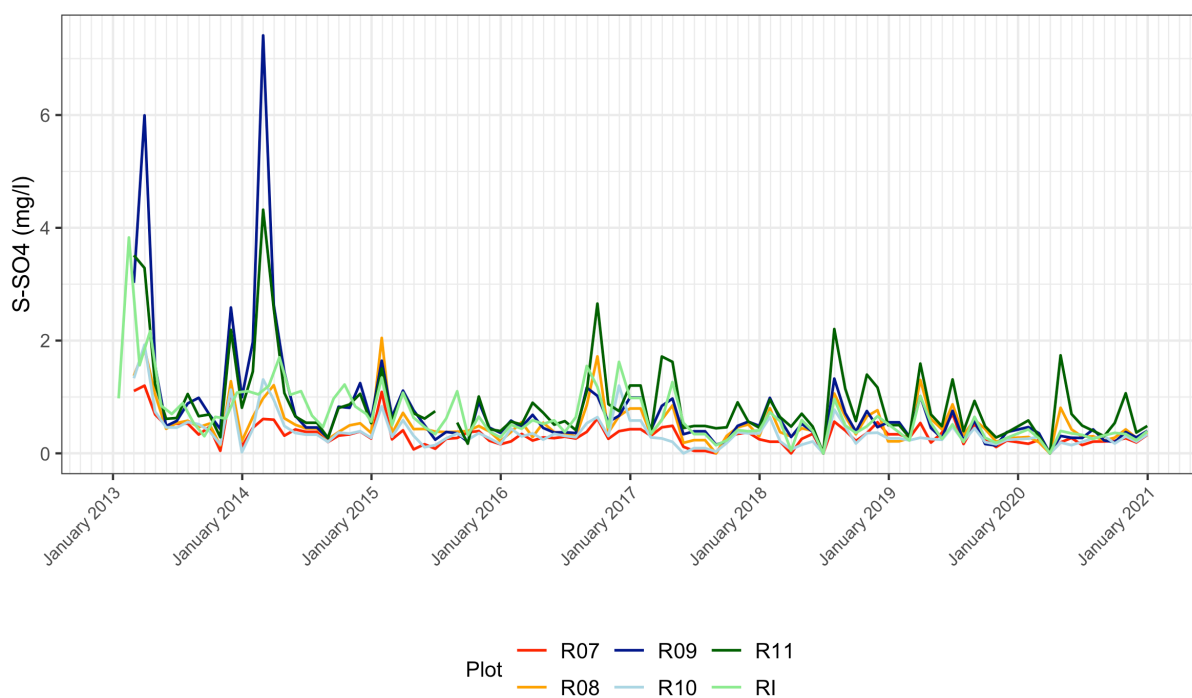


Figure 12 : concentrations en sulfates exprimées en S-SO₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous essences mélangées plantées en 1999 (R07), sous régénération d'épicéas de 1998 (R08), sous épicéas de 1885 (R09), sous essences mélangées plantées en 1999 (R10), sous mélange de sitkas et d'épicéas de 1980 (R11) et sous épicéas de 1885 (RI) dans le bassin versant de La Robinette entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

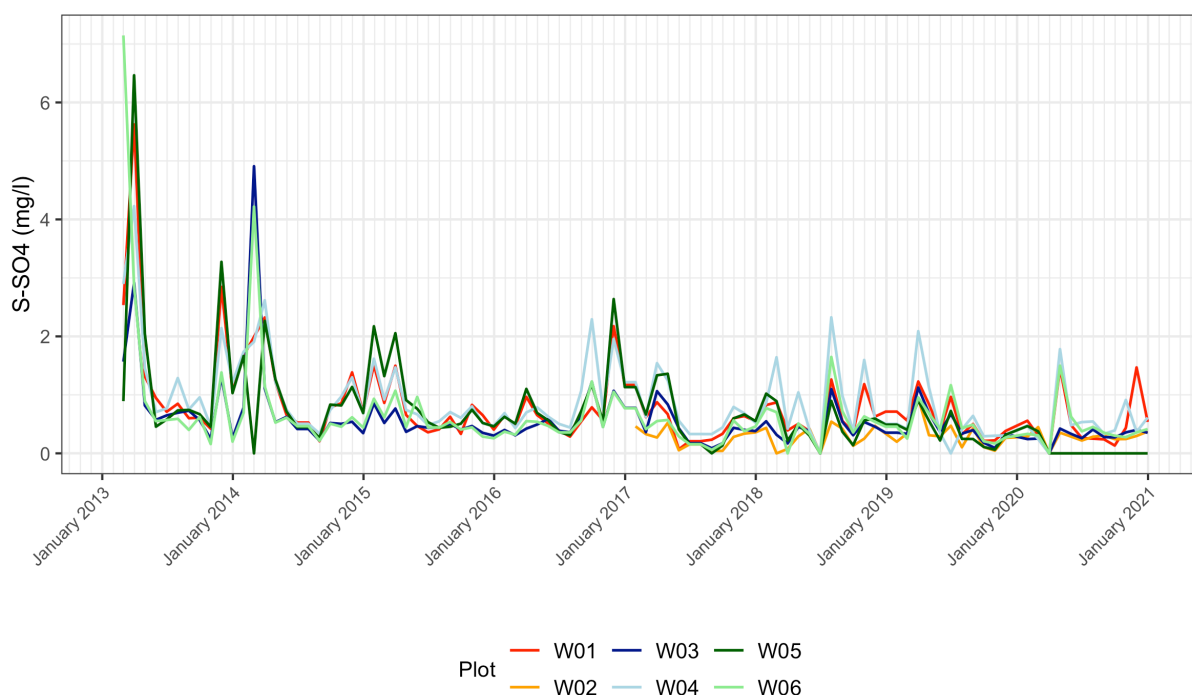


Figure 13 : concentrations en sulfates exprimées en S-SO₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous épicéas de 1906 (W01), sous essences mélangées plantées en 2015 (W02), sous chênes de 1885 (W03), sous épicéas de 1995 (W04), sous épicéas de 1935 (W05), sous hêtres de 1860 (W06) dans le bassin versant de Waroneu entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Aussi bien pour le bassin versant de La Robinette (fig. 12) que pour celui de Waroneu (fig.13), nous constatons que les concentrations en sulfates dans les pluviollessivats sont plus élevées sous les épicéas que sous les autres essences.

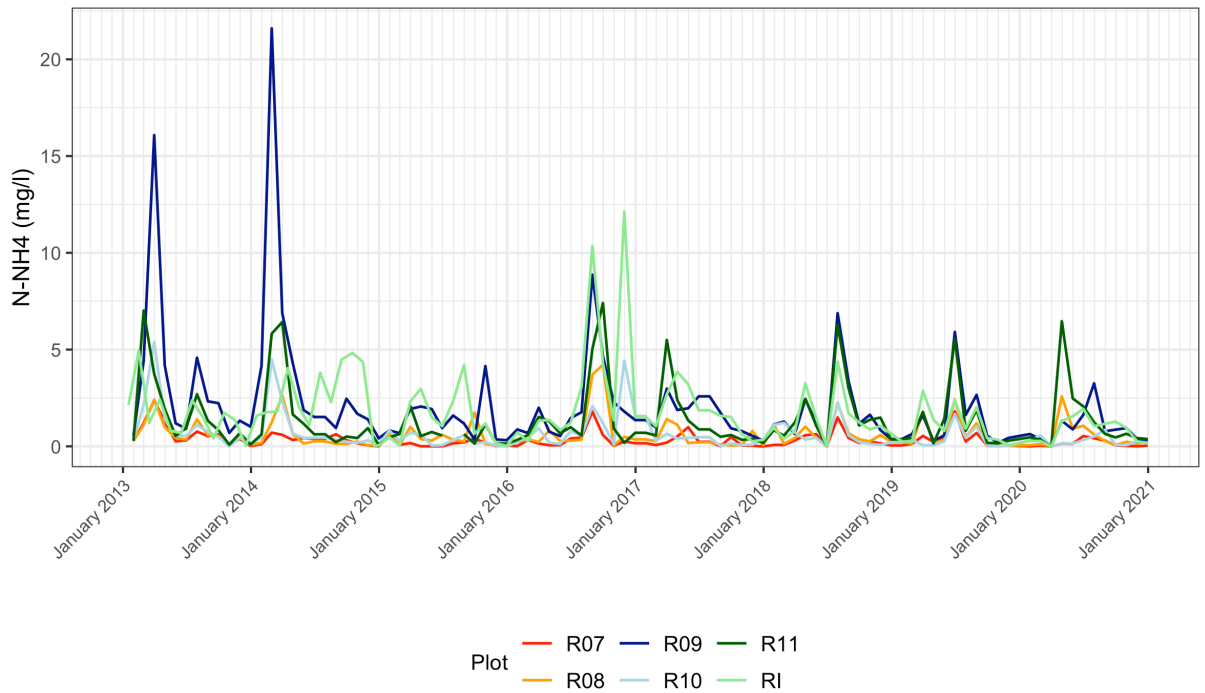


Figure 14 : concentrations en ammonium exprimées en N-NH₄ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous essences mélangées plantées en 1999 (R07), sous régénération d'épicéas de 1998 (R08), sous épicéas de 1885 (R09), sous essences mélangées plantées en 1999 (R10), sous mélange de sitkas et d'épicéas de 1980 (R11) et sous épicéas de 1885 (RI) dans le bassin versant de La Robinette entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

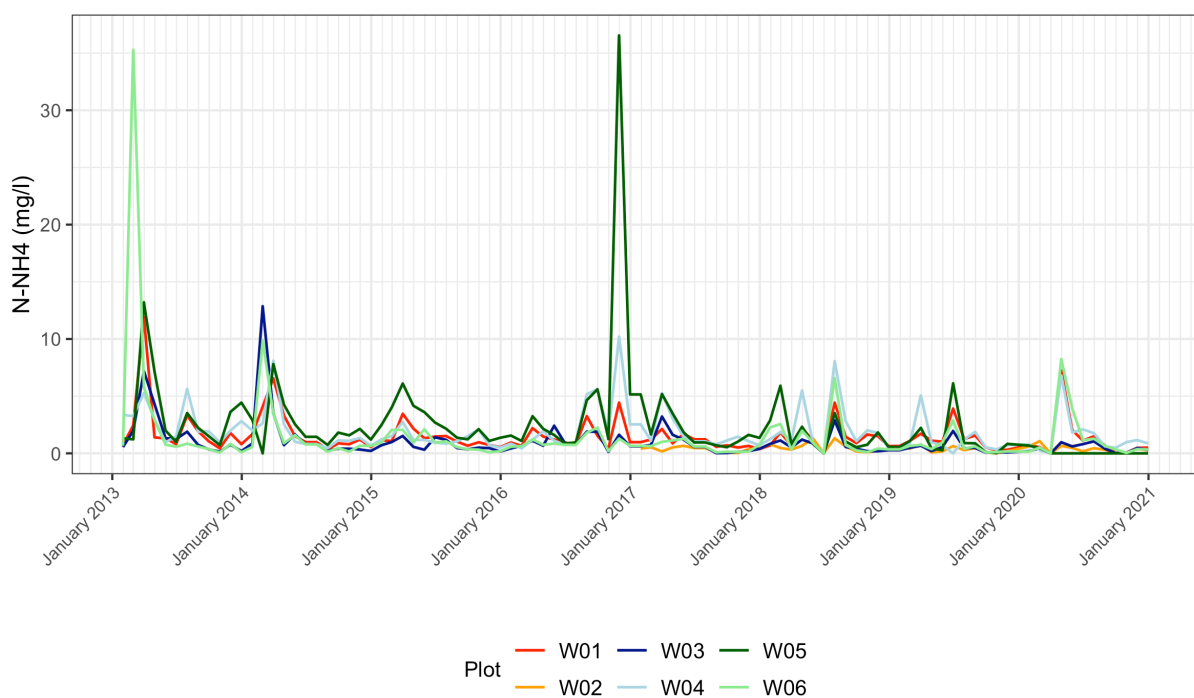


Figure 15 : concentrations en ammonium exprimées en $N-NH_4$ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous épicéas de 1906 (W01), sous essences mélangées plantées en 2015 (W02), sous chênes de 1885 (W03), sous épicéas de 1995 (W04), sous épicéas de 1935 (W05), sous hêtres de 1860 (W06)885 (RI) dans le bassin versant de Waroneu entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Dans les deux bassins versants (fig. 14 et 15) les concentrations en ammonium dans les pluviollessivats sont plus élevées sous les épicéas que sous les autres essences.

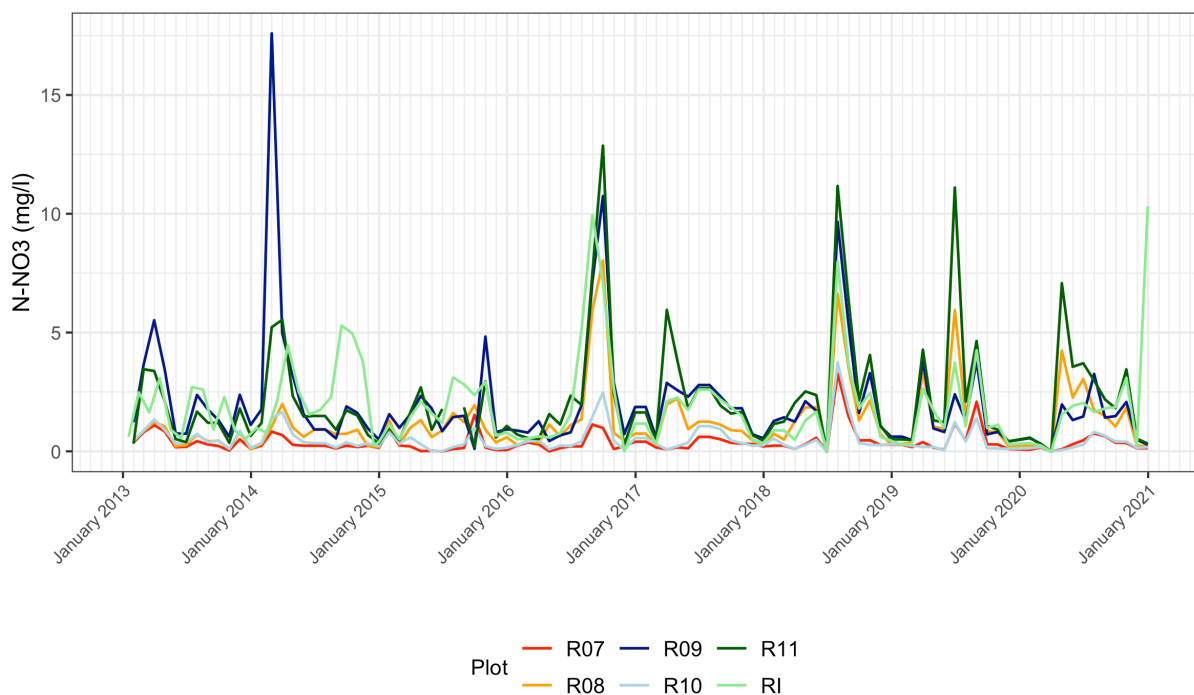


Figure 16 : concentrations en nitrates exprimées en $N-NO_3$ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous essences mélangées plantées en 1999 (R07), sous régénération d'épicéas de 1998 (R08), sous épicéas de 1885 (R09),

sous essences mélangées plantées en 1999 (R10), sous mélange de sitkas et d'écipéas de 1980 (R11) et sous écipéas de 1885 (R1) dans le bassin versant de La Robinette entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

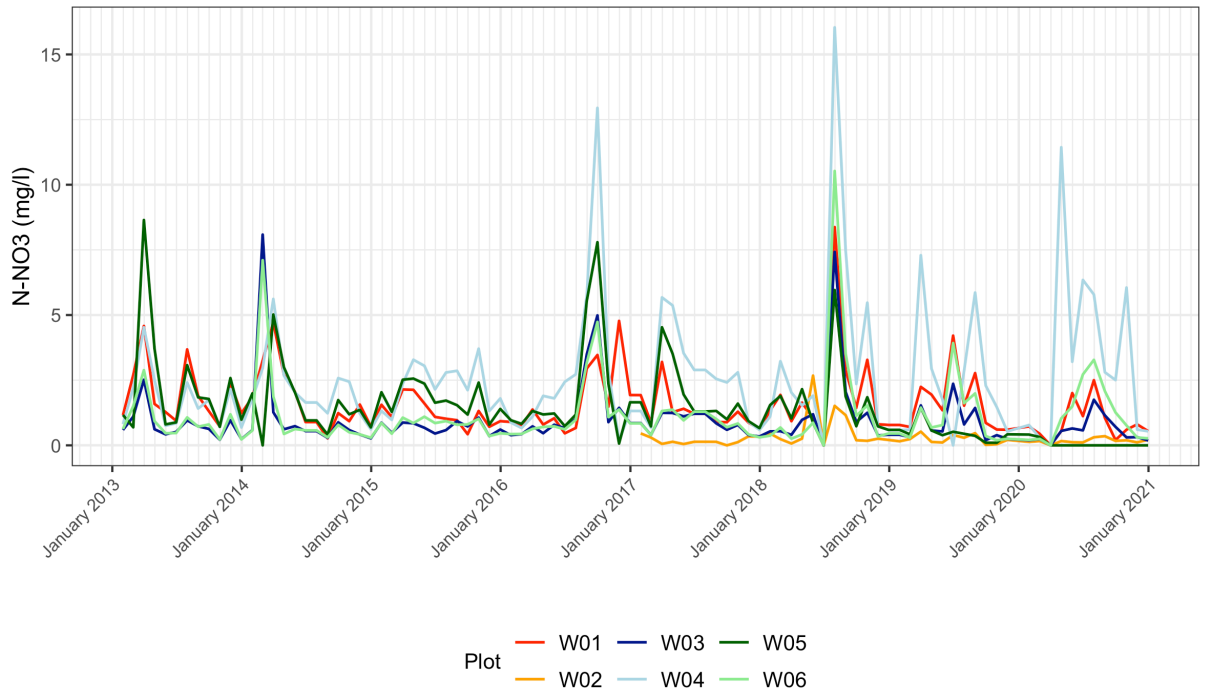


Figure 17 : concentrations en nitrates exprimées en N-NO₃ (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluiolessivats sous écipéas de 1906 (W01), sous essences mélangées plantées en 2015 (W02), sous chênes de 1885 (W03), sous écipéas de 1995 (W04), sous écipéas de 1935 (W05), sous hêtres de 1860 (W06)885 (R1) dans le bassin versant de Waroneu entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Comme pour les sulfates et l'ammonium, les concentrations en nitrates (fig. 16 et 17) dans les pluiolessivats sont plus élevées sous les écipéas que sous les autres essences, l'effet semble même plus marqué (à confirmer et quantifier avec le calcul des budgets). Les valeurs sous les pessières plus jeunes (W04 pour Waroneu ; R08 et R11 pour La Robinette), avec des densités d'arbres importantes deviennent de plus en plus importantes.

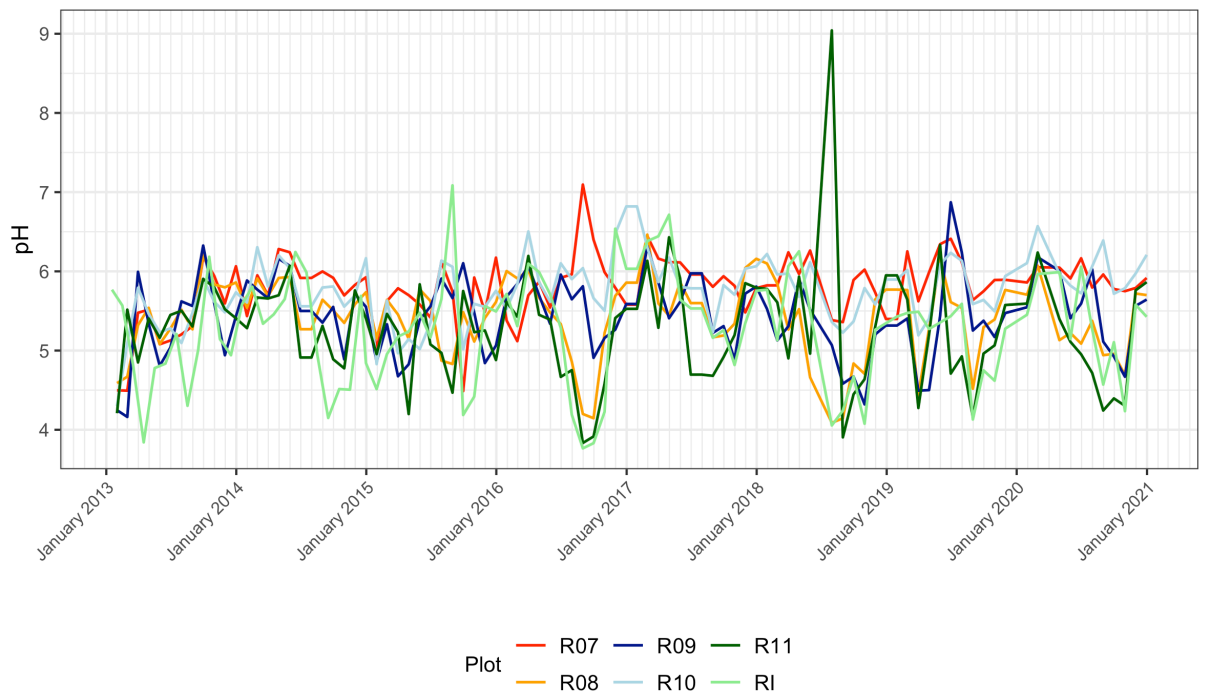


Figure 18 : valeurs de pH pondérées par le volume d'eau dans les pluiolessivats sous essences mélangées plantées en 1999 (R07), sous régénération d'épicéas de 1998 (R08), sous épicéas de 1885 (R09), sous essences mélangées plantées en 1999 (R10), sous mélange de sitkas et d'épicéas de 1980 (R11) et sous épicéas de 1885 (RI) dans le bassin versant de La Robinette entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Les analyses en séries temporelles devront ou non le confirmer, mais le pH dans les pluiolessivats deviendrait plus élevé sous le mélange d'essences feuillues planté dans les placettes R07 et R10 de La Robinette (fig. 18).

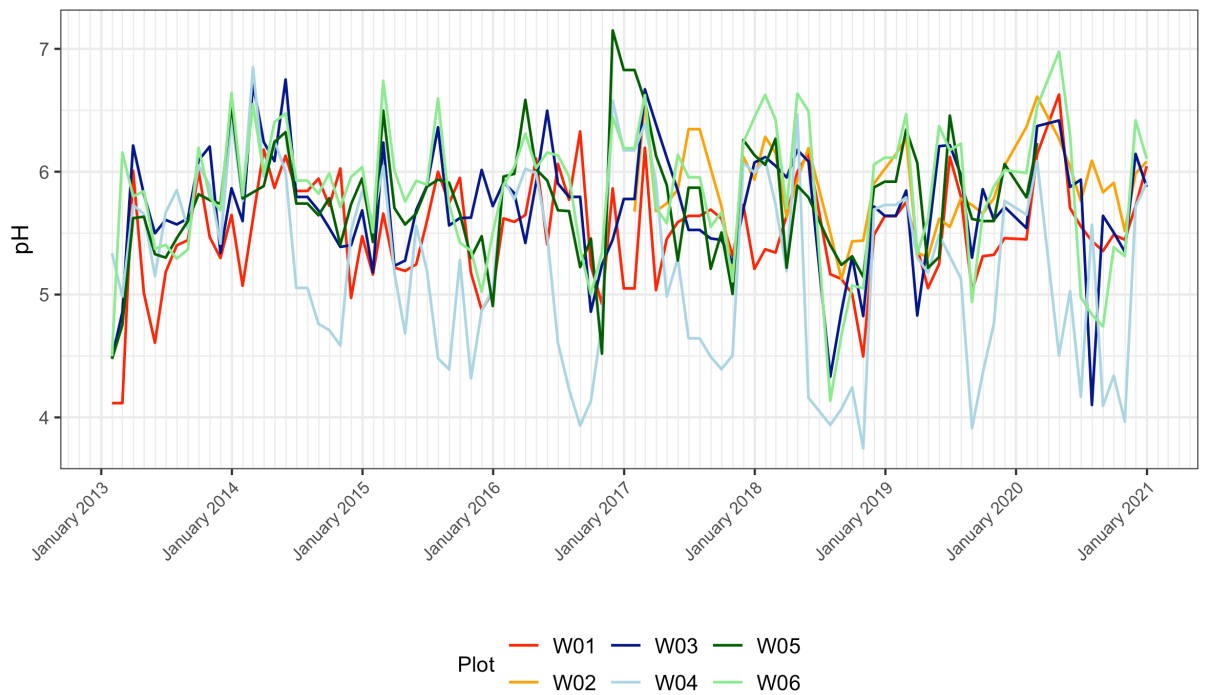


Figure 19 : valeurs de pH pondérées par le volume d'eau dans les pluviollessivats sous épicéas de 1906 (W01), sous essences mélangées plantées en 2015 (W02), sous chênes de 1885 (W03), sous épicéas de 1995 (W04), sous épicéas de 1935 (W05), sous hêtres de 1860 (W06) dans le bassin versant de Waroneu entre 2013 et fin 2020, moyennes mensuelles.

Dans le bassin versant de Waroneu, nous pouvons observer que l'acidité dans les pluviollessivats de la placette W04 (fig. 19) d'épicéas plantés en 1995 est plus grande.

Dépôts en éléments majeurs, calcium, potassium et magnésium :

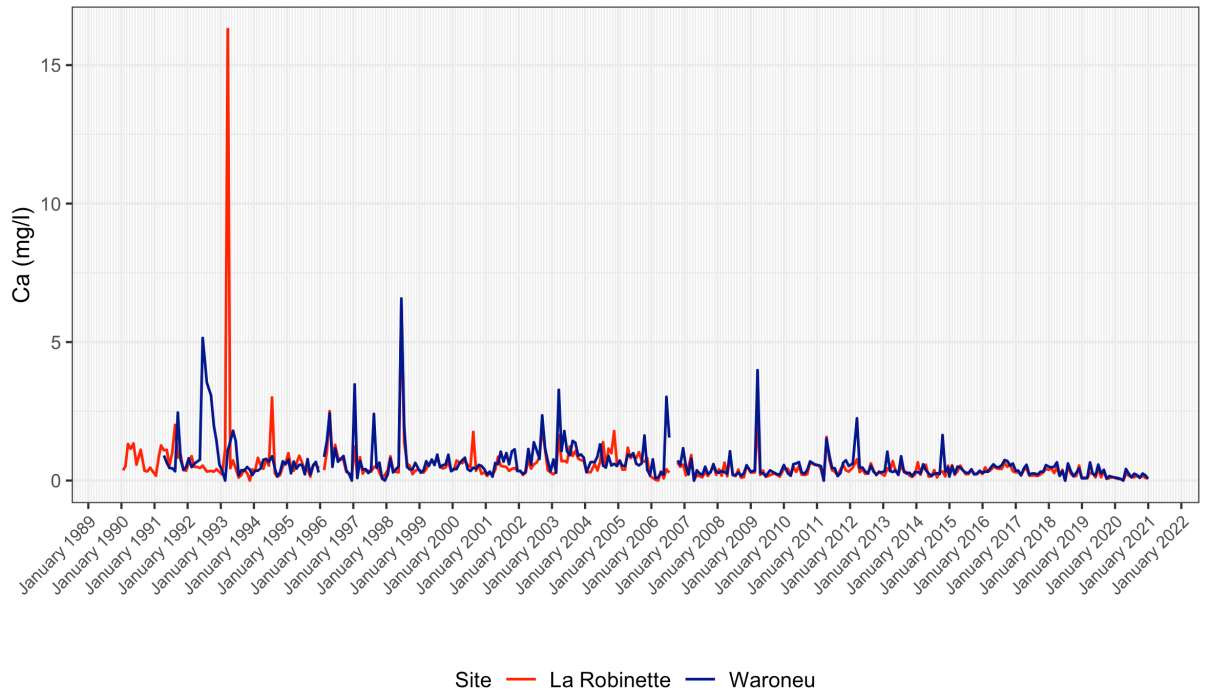


Figure 20 : concentrations en calcium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

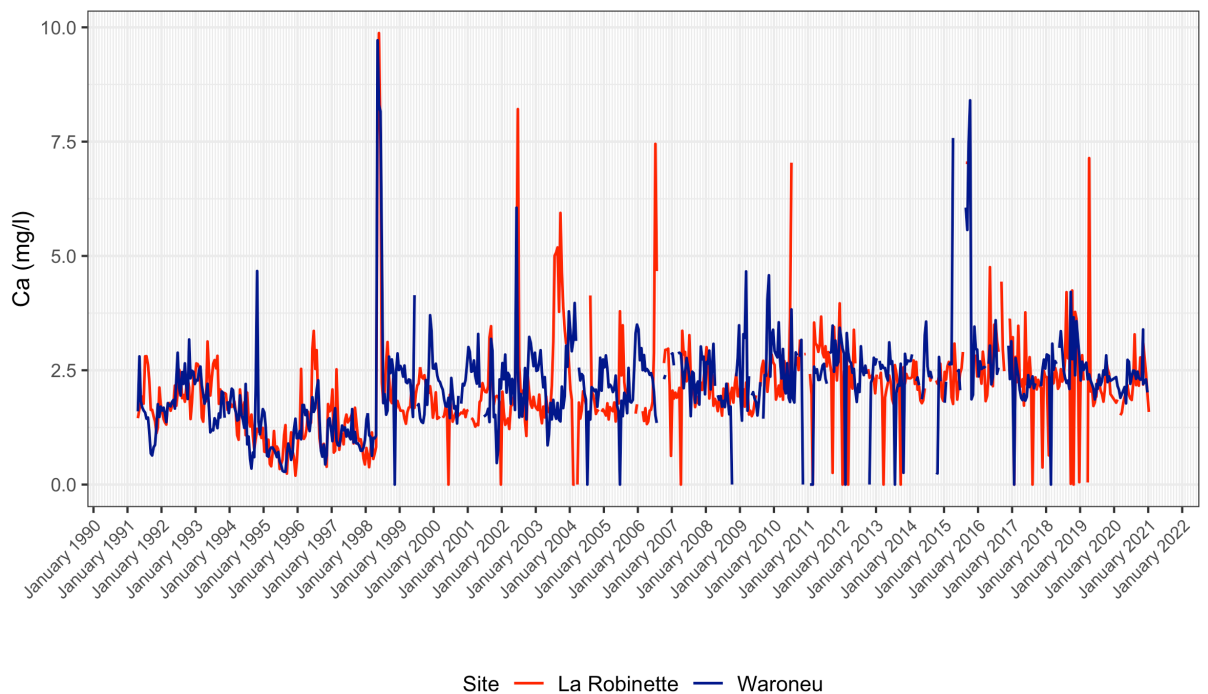


Figure 21 : concentrations en calcium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

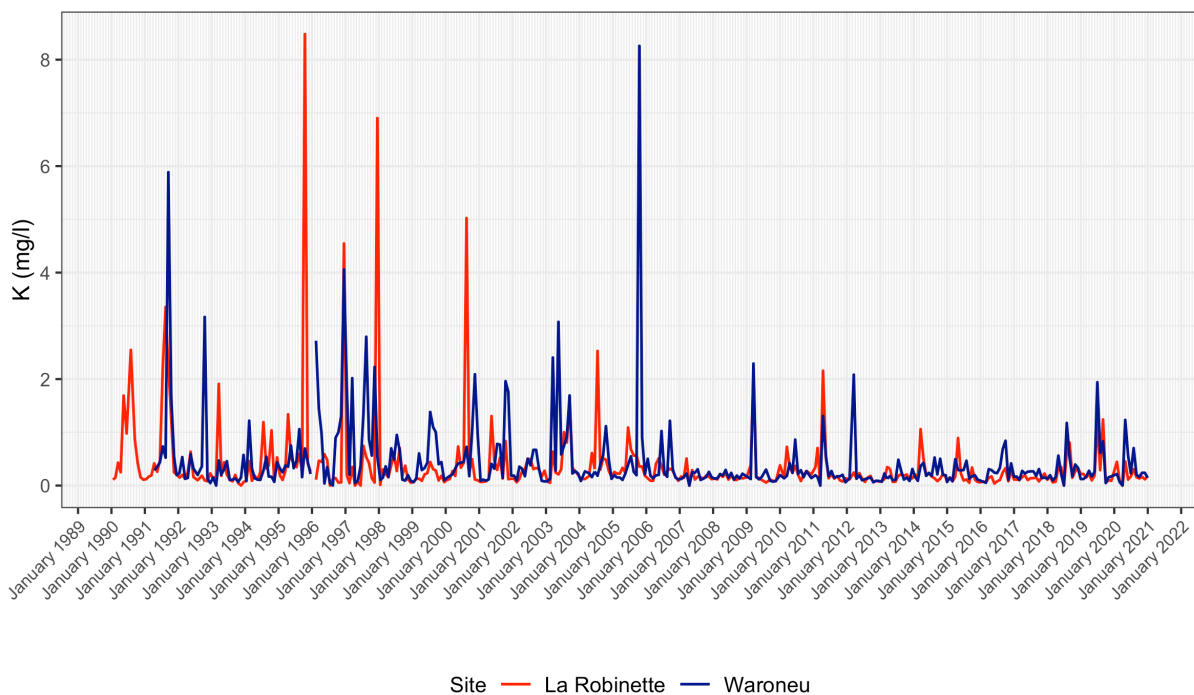


Figure 22 : concentrations en potassium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

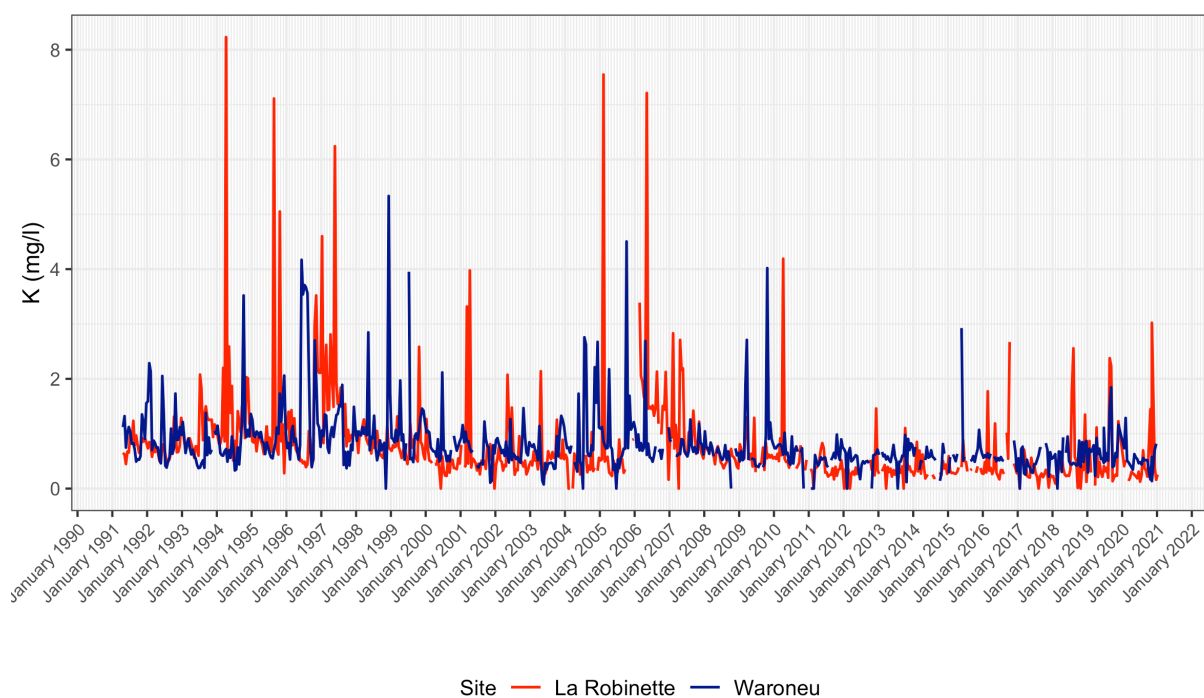


Figure 23 : concentrations en potassium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

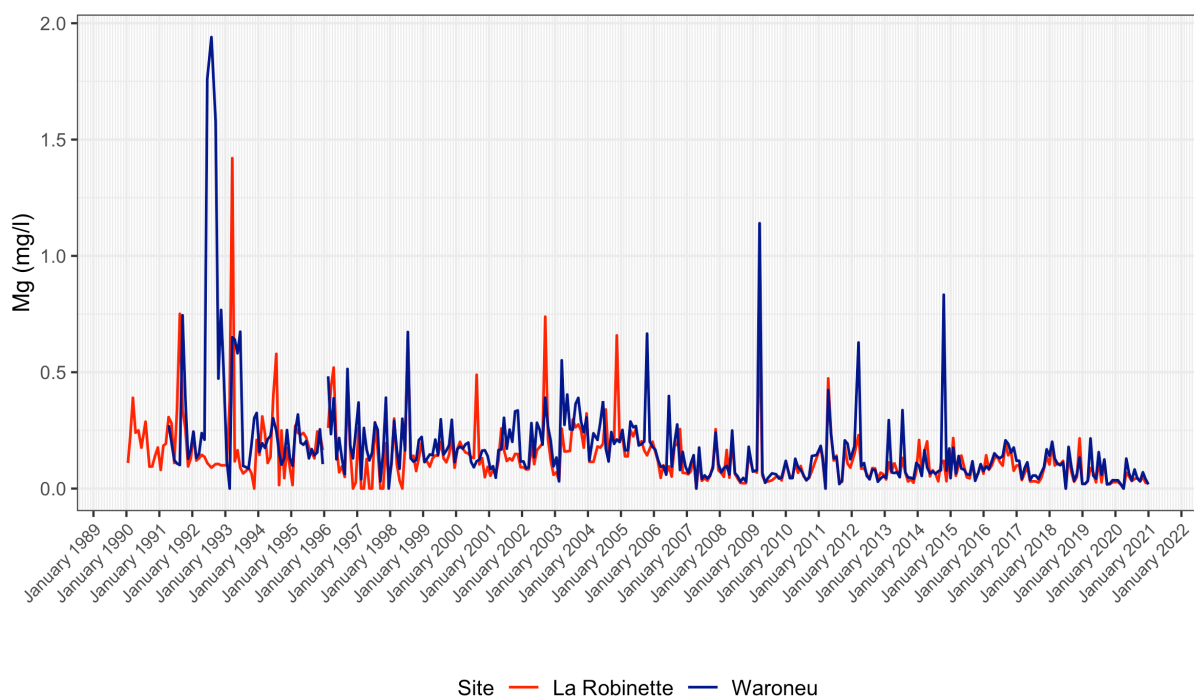


Figure 24 : concentrations en magnésium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les pluies à découvert pour les bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

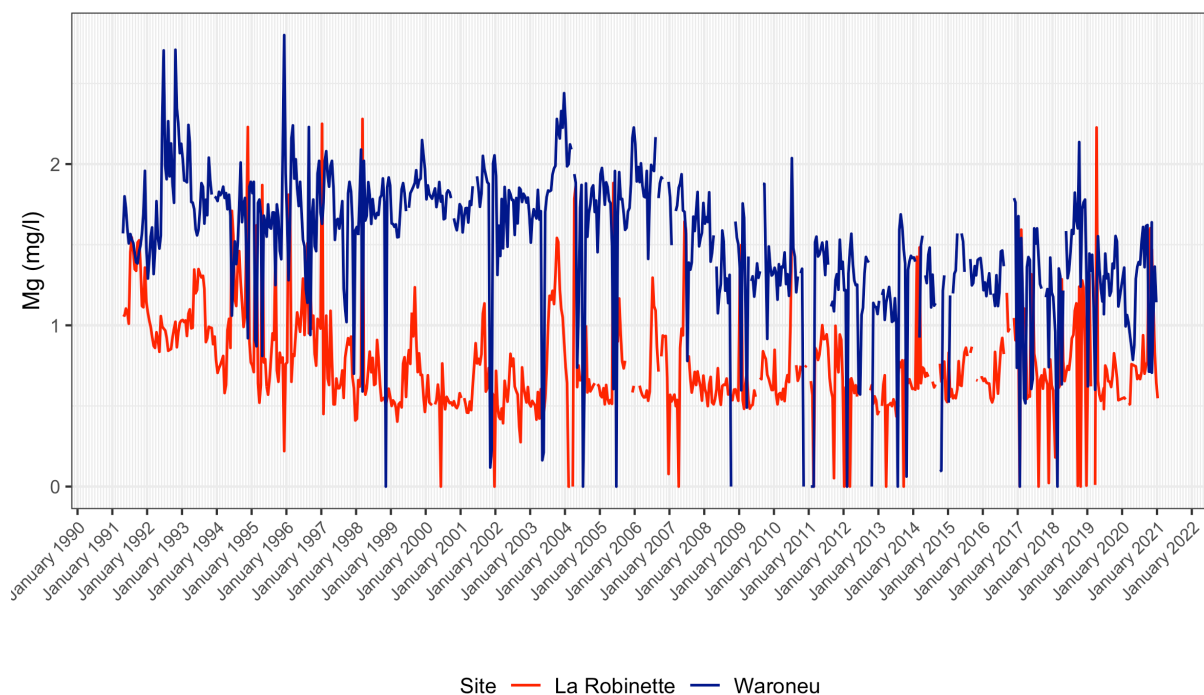


Figure 25 : concentrations en magnésium (mg/l) pondérées par le volume d'eau dans les exutoires des bassins versants de La Robinette (en rouge) et de Waroneu (en bleu) entre 1990 et fin 2020, moyennes mensuelles.

B2.4. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284

Le premier rapportage des données dans le cadre de la directive NEC 2016/2284 a été réalisé en juillet 2019. Nous avons aussi répertorié les données descriptives complémentaires des sites nécessaires. Une station météo a été installée à côté de la placette à découvert située dans la zone de gagnage au centre du bassin versant de La Robinette. L'emplacement a été choisi en fonction des recommandations 'ICP-Forest' (dont les protocoles servent de référence pour le programme NEC), particulièrement une distance entre la station et les arbres avoisinants supérieure à trois fois la hauteur des arbres. Pour stabiliser la station, une dalle en béton a été coulée, et, pour la protéger du gibier, une clôture de 1,6 m de haut a été érigée. Les paramètres mesurés sont : la direction et la vitesse du vent (à 2m de hauteur), l'intensité du rayonnement solaire, la température de l'air (à 1,5 m de hauteur), la pluviométrie, l'humidité et la température du sol à 20 et 40 cm de profondeur. L'alimentation électrique est assurée via une batterie rechargée par un panneau solaire, la station est ainsi autonome ce qui, au vu de la situation géographique du site, était indispensable. Les données sont collectées bimensuellement, les pas de données sont les mêmes que pour les autres stations du réseau RW.



Des sondes pour mesurer la température du sol (2 par placettes) ont été installées dans les placettes R07, R10 et W03 ; une sonde pour mesurer la température de l'eau a été installée à l'exutoire de La Robinette.

La réalisation de profils du sol et de caractérisation physico-chimique (densité, C/N, pH, acidité d'échange) est prévue à partir de janvier 2023. Cependant, nous sommes encore en attente d'un retour d'information suite à la soumission des données et d'une discussion sur les priorités de mise à niveau des sites.

B2.5 Valoriser et disséminer les résultats des recherches

Les recherches seront soumises à des revues à impact local (Forêt wallonne) et/ou des revues internationales (Ecological indicators, Biogeochemistry, Applied Soil Ecology) et présentés à des conférences internationales. La participation active au réseau LTER Belgium fait partie de la stratégie de dissémination. La base de données sera publiée sous forme de 'datapaper'. En fonction des besoins, des chapitres seront rédigés pour 'l'Etat de l'Environnement wallon'.

Le laboratoire est membre de divers réseaux :

- NETSOB « International Network on Soil Biodiversity » (FAO Global Soil Partnership) participation à : Groupe de travail-1 sur la mesure, l'évaluation et le suivi de la biodiversité des sols ; Groupe de travail-2 sur l'utilisation durable, la gestion et la conservation de la biodiversité des sols ;
- GLOSOLAN « Global Soil Laboratory network » (FAO Global Soil Partnership) et BESOLAN Belgium Soil Laboratory Network: participation aux travaux d'harmonisation des procédures opérationnelles standard (SOP) d'analyses des sols; expert du comité d'examen pour les techniques de mesure de « Microbial biomass C and N by chloroform fumigation-extraction », « Soil respiration rate », participation aux groupes de travail pour d'autres mesures (en préparation).
- SoilBON (« Soil Biodiversity Observation Network ») :Participation à l'effort mondial coordonné pour surveiller la biodiversité des sols et la fonction des écosystèmes par l'échantillonnage de sols et d'eau dans nos sites pour l'analyse de la diversité microbienne dans le cadre d'une initiative conjointe SoilBON et LTER (2022).

B3. ETP réel au jour de la présentation (justification en cas de modification)

Nom	ETP	Titre	Financement (volet du plan)	H.mois effectif	H.mois effectif Cumulé5 ans
Bernard Bosman	100%	Lic.	DNF (volet 1)	12	/
André Piret	100%	Technicien	DNF (volet 1)	12	/
Assia Tahiri	100%	Technicienne	DNF (volet 1)	12	/

B4. Documents et/ou outils (livrables) produits et à produire modifiés le cas échéant et raisons

n/a

B5. Collaborations diverses (tous niveaux confondus)

Entre le 06 et le 19 novembre 2020 un échantillonnage de sols a été réalisé pour mesurer les indicateurs de la qualité des sols sélectionnés lors des subventions précédentes. 30 sites ont été choisis en étroite collaboration avec le laboratoire du Prof. Quentin Ponette. En effet, ces sites ont fait ou vont faire l'objet d'une campagne de mesure dans le cadre de l'action 1.4.a « Identification des zones à risques nutritionnels ». Ainsi en combinant nos ressources et nos expertises nous pourrions disposer de meilleurs outils pour évaluer les processus au sein des sols forestiers.

Cet automne, toujours en collaboration avec le laboratoire du Prof. Quentin Ponette, un échantillonnage de sol sera réalisé sur le site du projet 'FORBIO' de Gedinne. Ce site présente un ensemble de parcelles expérimentales plantées avec des degrés de diversité différents de 5 essences forestières (Érable sycomore, Hêtre commun, Mélèze hybride, Douglas et Chêne sessile). Nous pourrions donc étudier l'influence de la diversité des arbres sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols. Afin de préparer cet échantillonnage, une visite de terrain a eu lieu le 16 août 2022.

Nous avons des accords de collaboration avec le Prof. Bas van Wesemael (UCLouvain) pour étudier les fractions de carbone dans les échantillons prélevés (utilisation du matériel et de l'expertise de son laboratoire) et le Dr. Petr Baldrian (Institute of Microbiology of the CAS, Prague) afin de réaliser des analyses de la diversité microbienne moléculaire. Des échantillons de sol ont été préservés lors de l'échantillonnage réalisé lors de cette subvention, et leur analyse dépendra des discussions sur l'orientation des recherches et du budget disponible (voir perspectives).

Le Dr. Anne Chandelier (CRA) est intervenue dans un cours du Prof. Carnol pour sensibiliser les étudiants aux maladies émergentes des essences forestières (15/3/2022). Deux sujets de mémoire en commun ont été proposés aux étudiants.

B6. Activités de communication et de publications (déclinées par type – scientifique, vulgarisation, conférences scientifiques, international, autres)

Animation au « Fascination of Plant Day 2022 » (6 juin 2022) : 'Le sol- garde-manger des plantes', avec explication des recherches en cours dans les bassins versants.

B7. Perspectives et proposition de calendrier 2020-2024

	2020			2021			2022			2023			2024				
Tâches	mai-juin	juil-sept	oct-déc	janv-mars	avr-juin	juil-sept	oct-déc	janv-mars	avr-juin	juil-sept	oct-déc	janv-mars	avr-juin	juil-sept	oct-déc	janv-mars	avr-juin
Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et flux en éléments minéraux, et en carbone organique dans deux bassins versants forestiers																	
Récoltes et analyses chimiques																	
Gérer la base de données (mise à niveau)																	
Étudier l'évolution à long terme des dépôts acides et azotés																	
Étudier l'évolution à long terme des flux entrées-sorties																	
Étudier l'effet des essences sur les relations entrées, solution du sol, processus microbiens																	
Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers																	
Echantillonnages*															#		
Développement de la méthode Microresp																	
Extractions et analyses chimiques															#		
Analyses de données																#	
Création d'une base de données sols (Bassins versants)																	
Création d'une base de données sols (Wallonie)																	
Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284																	
Station météo																	
Sondes température/humidité sol																	
Echantillonnage caractérisation des sols																	
Analyses chimiques caractérisation sols																	
Analyse des données																	
Valoriser et disséminer les résultats des recherches																	
Rapports																	
Publications scientifiques																	
Autre																	

#échantillonnage oct-déc 2023 : sous réserve (en fonction de l'avancement des recherches et des discussions sur les priorités de recherche)

*thématiques : voir texte

Pour les recherches 2020-21, nous avons regroupé les thématiques liées au suivi et à l'étude à long terme des bassins versants (« Étudier l'évolution à long terme des dépôts acides et azotés », « Gérer la base de données ») sous le volet « Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et flux en éléments minéraux, carbone organique dans deux bassins versants forestiers ». Nous avons également ajusté le calendrier en fonction des difficultés rencontrées, notamment par rapport à la base de données.

Pour la poursuite des travaux 2022-24, nous avons ajouté deux volets : « Étudier l'évolution à long terme des flux entrées-sorties », « Étudier l'effet des essences sur les relations entrées, solutions du sol et processus microbiens » à la section « Étude à long terme ».

Nous planifions 2 échantillonnages de sols supplémentaires pour l'étude de la qualité des sols. Le choix des études se fera en concertation avec le comité de pilotage et les partenaires du Plan quinquennal. Les propositions de sujets d'étude sont :

- Influence de la diversité des essences sur la qualité biologique des sols : échantillonnage au sein des plantations expérimentales du dispositif FORBIO : site de Gedinne (et site de Zedelgem ?). Ces sites comprennent des plantations avec des parcelles de 1 à 5 espèces d'arbres dans un plan expérimental bien défini (Verheyen et al., 2013).
- Effet de la gestion des rémanents sur la qualité des sols forestiers : cette thématique est issue d'une discussion avec Ing. François Baar (Cantonement de la Roche en Ardenne).
- Étude de la qualité des sols forestiers wallons : étude de sites complémentaires au premier échantillonnage (p.ex. sous Douglas)

Il y a des possibilités de recherches plus approfondies sur la compréhension du fonctionnement des sols forestiers, comme l'étude de la nitrification dans les sols forestiers wallons, et l'étude de la diversité microbienne en relation avec le stockage de la matière organique des sols. Cependant, ces recherches nécessiteraient la possibilité d'engagement d'un.e doctorant.e via des fonds complémentaires.

B8. Autres références éventuellement citées (bibliographie utilisée le cas échéant).

Augusto, Laurent, Jacques Ranger, Dan Binkley, et Andreas Rothe. « Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility ». *Annals of Forest Science* 59, n° 3 (2002): 21. doi:10.1051/forest:2002020.

Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., Rothe, A., 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3): 233-253.

Bazgir, M., « Nutrient fluxes and soil microbial processes ». Thèse, Université Liège, 2011. <http://hdl.handle.net/2268/95322>.

Bosman, B., Remacle, J. & Carnol, M. Element Removal in Harvested Tree Biomass: Scenarios for Critical Loads in Wallonia, South Belgium. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus* 1, 153–167 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1011590713192>

Bosman, B. et Carnol, M. « Rapport de recherche de la subvention entre le Service Public de Wallonie et l'Université de Liège: Indicateurs biologiques des sols forestiers ». Université de Liège, février 2012. <http://hdl.handle.net/2268/117896>.

Bosman, B. et Carnol, M. « Rapport de recherche de la subvention entre le Service Public de Wallonie et l'Université de Liège: Impact des essences et des mesures de gestion sylvicole sur les activités microbiennes et la biogéochimie des écosystèmes forestiers ». Université de Liège, septembre 2015. <http://hdl.handle.net/2268/195467>.

Bosman, B., Vincent, Q., Ratcliffe, S., et Carnol, M. « Rapport de recherche de la subvention entre le Service Public de Wallonie et l'Université de Liège: Etude à long terme de la biogéochimie des écosystèmes forestiers (2020) ». Université de Liège, mai 2020. <http://hdl.handle.net/2268/249832>.

Bosman, B. et Carnol, M. « Rapport de recherche de la subvention entre le Service Public de Wallonie et l'Université de Liège: Impact des essences et des mesures de gestion sylvicole sur les activités microbiennes et la biogéochimie des écosystèmes forestiers ». Université de Liège, septembre 2015. <http://hdl.handle.net/2268/195467>.

- Carnol M, 1996."Etude comparée de paramètres écosystémiques et de l'évolution phytosanitaire de peuplements situés dans des couples de bassins versants". Convention entre la région Wallonne et l'Université de Liège. Rapport final, Mars 1996. Laboratoire d'Ecologie Végétale et Microbienne. Université de Liège. Liège
- Carnol M, Bosman B, 1999."Stabilisation de l'écosystème forestier: effets du reboisement du bassin versant de la Robinette sur les flux en éléments minéraux". Convention entre la région Wallonne et l'Université de Liège. Rapport final, Mars 1999. Laboratoire d'Ecologie Végétale et Microbienne. Université de Liège. Liège
- Carnol, M., et Bazgir, M., « *Nutrient return to the forest floor through litter and throughfall under 7 forest species after conversion from Norway spruce* ». *Forest Ecology and Management* 309, (2013): 0378-1127. <http://hdl.handle.net/2268/147954>
- Carnol, Monique, Lander Baeten, Etienne Branquart, Jean-Claude Grégoire, André Heughebaert, Bart Muys, Quentin Ponette, et Kris Verheyen. « Ecosystem Services of Mixed Species Forest Stands and Monocultures: Comparing Practitioners' and Scientists' Perceptions with Formal Scientific Knowledge ». *Forestry* 87, n° 5 (12 janvier 2014): 639-53. doi:10.1093/forestry/cpu024.
- Carnol, M., et Verheyen, K., « Les services écosystémiques dans les forêts mélangés et pures: perception des utilisateurs et connaissances scientifiques ». *Forêt Nature* 106, (mai 2010): 49-59. <http://hdl.handle.net/2268/37280>.
- Haase, P., Frenzel, M., Klotz, M. Musche, S. Stoll "The Long-Term Ecological Research (LTER) network: relevance, current status, future perspective and examples from marine, freshwater and terrestrial long-term observation" *Ecol. Indic.*, 65 (2016), pp. 1-3, [10.1016/j.ecolind.2016.01.040](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.040).
- Hornbeck, J.W. et al., 1986. Clearcutting northern hardwoods: Effects on hydrologic and nutrient ion budgets. *Forest Science*, 32(3): 667-686.
- Likens, G., Bormann, F.H., *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. 1995 : 159p. Springer-Verlag New York.
- Lindenmayer, David & Likens, Gene. (2010). The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation*. 143. 1317-1328. [10.1016/j.biocon.2010.02.013](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.013).
- Martin, C. W. & Harr, R. D., 1989: Logging of mature Douglas fir in western Oregon has little effect on nutrient output budgets.-*Can. J. Forest Res.* 19: 35-43.
- Nambiar, Sadanandan. (1996). Sustained Productivity of Forests Is a Continuing Challenge to Soil Science. *Soil Science Society of America Journal - SSSAJ*. 60. [10.2136/sssaj1996.03615995006000060006x](https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000060006x).
- Ranger, J., & Turpault, M.-P. (1999). Input-Output Nutrient Budgets as a Diagnostic Tool for Sustainable Forest Management. *Forest Ecology and Management*, 122, 139-154. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00038-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00038-9)
- Ranger J., Marques R., Colin-Belgrand M., Flammang N., Gelhaye D. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco)

- stand studied using a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management*, 72 (1995), pp. 167-183
- Ratcliffe, S. Bosman, B. et Carnol, M., 2018. *Spatial and temporal variability of biological indicators of soil quality in two forest catchments in Belgium*. *Applied Soil Ecology*, 126: 148-159.
- Rodda, J C. *Facets of hydrology*. United States: N. p., 1985
- Vanderbilt, Kristin & Gaiser, Evelyn. (2017). The International Long Term Ecological Research Network: a platform for collaboration. *Ecosphere*. 8. e01697. 10.1002/ecs2.1697.
- Verheyen, K., Ceunen, K., Ampoorter, E., Baeten, L., Bosman, B., Branquart, E., ... Ponette, Q. (2013). Assessment of the functional role of tree diversity: the multi-site FORBIO experiment. *Plant Ecology and Evolution*, 146(1), 26–35. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2013.803>
- Wulff, S., Lindelöw, Å., Lundin, L. *et al.* Adapting forest health assessments to changing perspectives on threats—a case example from Sweden. *Environ Monit Assess* **184**, 2453–2464 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2130-7>
- Zhang, S.Q, F.D Zhang, et X.M Liu. «Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots-- 《Plant Nutrition and Fertilizing Science》 , 2005. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-ZWYF200506018.htm.