



**ÉCOLOGIE VÉGÉTALE  
ET MICROBIENNE**

Département Biologie,  
Écologie, Évolution

Professeur M. CARNOL

---

Plan quinquennal de Recherches forestières 2019-2024

Subvention 01/07/2022-30/06/2023

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

<p><b>ÉTUDE À LONG TERME DE LA BIOGÉOCHIMIE DES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS</b></p>
--

**Action 0.5, Rapport d'activité, aout 2023**

**B. BOSMAN et M. CARNOL**

Responsable scientifique : Prof. Monique Carnol  
Équipe de recherche : Bernard Bosman, scientifique  
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 2022-2023 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 .....	8
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 .....	8
B2.2 Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers .....	12
B.2.2.2. Matériel et méthodes - .....	14
B.2.2.2. Résultats - .....	21
B2.3. Gérer les bases de données .....	22
B.2.3.1. A .....	22
Analyses statistiques .....	22
B2.4. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284 .....	59
B2.5. Valoriser et disséminer les résultats des recherches .....	61
B3. ETP réel au jour de la présentation (justification en cas de modification) .....	62
B4. Documents et/ou outils (livrables) produits et à produire modifiés le cas échéant et raisons .....	62
B5. Collaborations diverses (tous niveaux confondus) .....	62

B6. Activités de communication et de publications (déclinées par type – scientifique, vulgarisation, conférences scientifiques, international, autres).....	63
B7. Perspectives et proposition de calendrier 2020-2024 .....	63
B8. Autres références éventuellement citées (bibliographie utilisée le cas échéant).....	64

# **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 2022-2023.

## **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'État de l'environnement wallon (Dépassement des charges critiques en polluants acidifiants et eutrophisants, Qualité biologique des sols).

Cette subvention 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'Écologie 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, pluviolessivats) 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. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284
4. Valoriser et disséminer les résultats de recherches

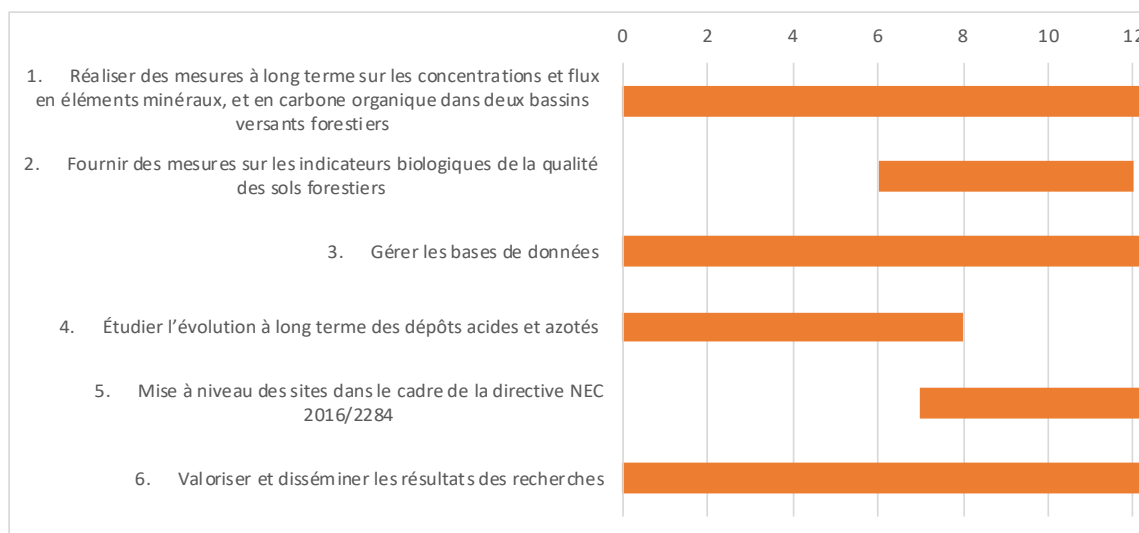
## A3. Résultats attendus (par le COPIL initialement)

Na

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

Subvention de 12 MOIS (du 1er juillet 2022 au 30 juin 2023) ; 224910 euros

## A5. Calendrier 2022-2023 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)**

**2022-2023 (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)	2	/
Assia Tahiri	100%	Technicienne	DNF (volet 1)	2	/
Assia Tahiri	80%	Technicienne	DNF (volet 1)	10	/

### **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, en plus de leur contribution cruciale à la régulation du climat, abritent une biodiversité importante, offrent des ressources renouvelables et fournissent des services écosystémiques essentiels. Face aux défis environnementaux contemporains, tels que les changements climatiques et la pollution atmosphérique, la préservation et la gestion durables des écosystèmes forestiers revêtent d'une importance capitale. Les recherches forestières s'orientent par conséquent vers des études visant non seulement l'optimisation de la production de bois, mais également la compréhension du fonctionnement de l'écosystème forestier dans son ensemble, afin d'optimiser sa résilience face aux perturbations et de maintenir sa qualité et sa santé à long terme.

À ce titre l'étude des sols a longtemps été négligée et nos connaissances sur les sols sont très lacunaires. Pourtant cette ressource non renouvelable joue un rôle essentiel dans la fourniture de nutriments, la régulation de l'eau et le stockage de carbone et les actions sylvicoles peuvent influencer les sols de façon non négligeable. La santé des sols forestiers est cruciale pour maintenir la biodiversité et la production de bois, mais également pour réguler les cycles biogéochimiques et préserver la qualité de l'eau.

D'autre part, vu la durée des révolutions forestières et l'évolution lente de certains paramètres, une approche d'étude à long terme des écosystèmes forestiers est un outil reconnu important pour suivre les changements graduels dans les écosystèmes forestiers, d'identifier les tendances émergentes, et de détecter les signaux d'alerte précoces. Ces études de suivi à long terme fournissent des informations sur la dynamique des peuplements forestiers qui ne peuvent pas être obtenues à partir des inventaires forestiers ou de petites parcelles temporaires.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent projet de recherche qui vise à étudier la qualité des sols dans les écosystèmes forestiers wallons et de déterminer l'évolution à long terme des polluants atmosphériques, des eaux à l'exutoire d'un bassin versants, comme indicateur du fonctionnement de l'écosystème forestier et de son équilibre nutritionnel.

Les objectifs de l'action 0.5 abordés en détail dans ce rapport sont :

- Constitution et vérification d'une base de données sur les mesures réalisées au cours de 30 dernières années
- Déterminer l'effet du hêtre et de l'épicéa sur la qualité des sols
- Analyser l'évolution à long terme des dépôts en substances acidifiantes et eutrophisantes
- Rapportage directive NEC (UEn°2016/2284)

## **B2. Brève description des activités de recherche et résultats**

### **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).

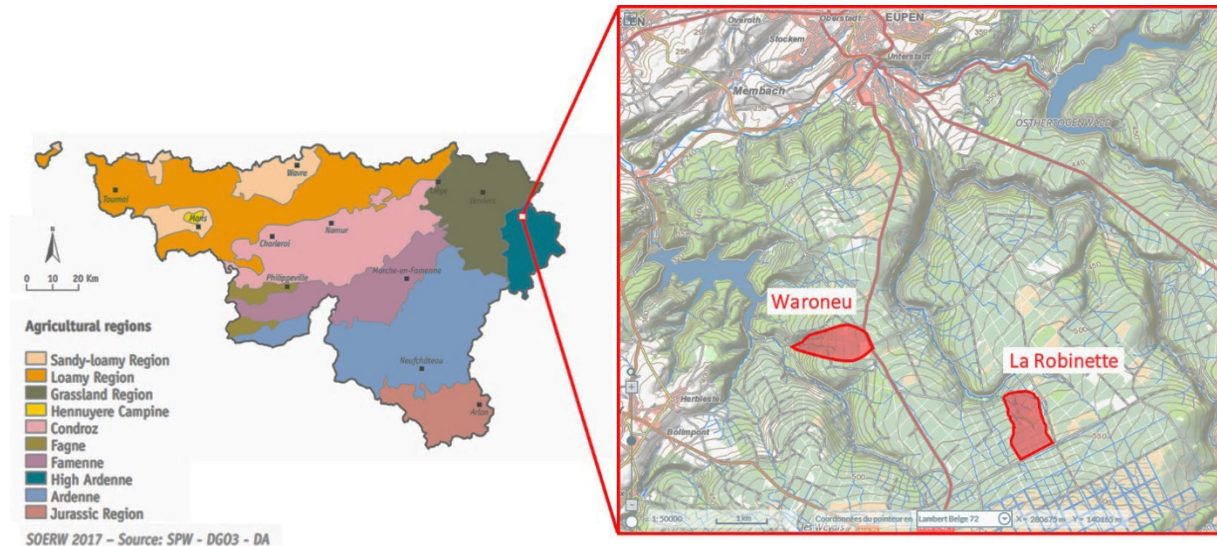


Fig. 1 : localisation des bassins versants de La Robinette et de Waroneu parmi les régions agricoles de Wallonie.

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, douze placettes d'étude intensives (6 par bassin versant) ont été établies sur base des unités végétation-sol prédominantes (fig 2, fig 3). Ces placettes sont équipées chacune avec 6 stations pluviométriques et 8 bougies poreuses (récolte 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>).

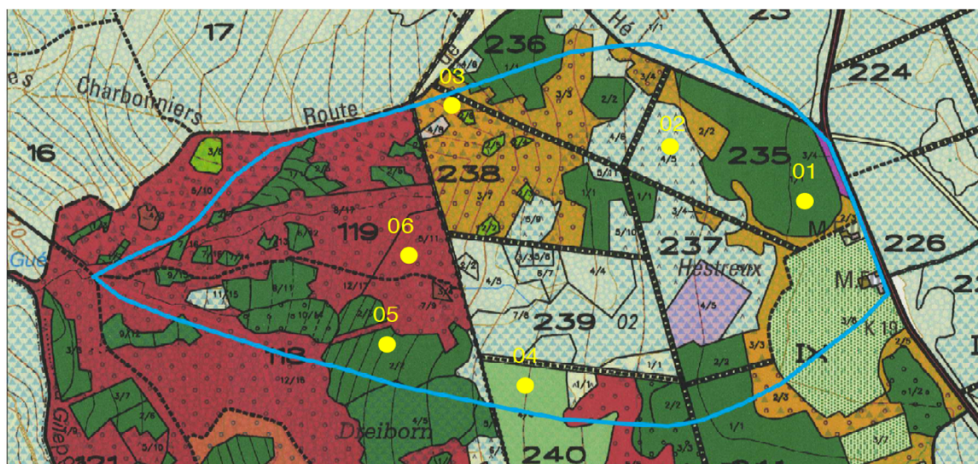


Fig. 2 : disposition des 6 placettes du bassin versant de Waroneu ;  
 01 : épicéas adultes (1906) sur sol hydromorphe, désinstallée en 2022,  
 02 : essences en mélange sur sol hydromorphe ; entre 2013 et 2017 à découvert,  
 03 : chênes (1885) sur sol brun acide,  
 04 : épicéas jeunes (1995) sur sol hydromorphe,  
 05 : épicéas adultes (1935) sur sol brun acide ; désinstallée en 2020,  
 06 : hêtres (1860) sur sol brun acide en pente.

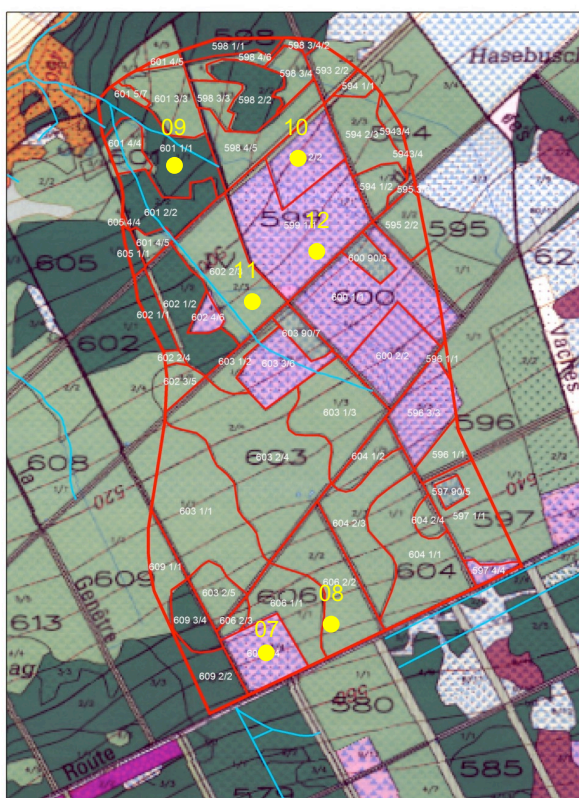


Fig. 3 : disposition des 6 placettes du bassin versant de la Robinette ;  
 07 : parcelle 1 essences en mélange sur sol hydromorphe (1999),  
 08 : épicéas (1998) sur sol hydromorphe,  
 09 : épicéas adultes (1930) sur sol brun acide,  
 10 : parcelle 4 essences en mélange sur sol brun acide (1999),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

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 pluviollessivats 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.

Au cours de cette subvention, 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) et 13 Placettes d'études intensives (6 Waroneu, 7 Robinette) : 6 pluviomètres par placette (pluies à découvert ou pluviollessivats, selon la 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.

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.

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.

La parcelle W01 (épicéas plantés en 1906) a été coupée en 2022, la station est désinstallée. Il n'y a plus de peuplement 'âgé' d'épicéas dans le bassin versant de Waroneu.

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

### **B.2.2.1. Échantillonnages réalisés**

#### **Qualité biologique des sols sous hêtre et épicéa**

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'. Des sous-échantillons ont été stockés pour des analyses complémentaires éventuelles.

Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous. Une étroite collaboration est prévue avec l'équipe de Q. Ponette pour l'analyse commune des résultats des deux équipes.

#### **Effet du mélange d'essences sur la qualité des sols**

En octobre 2022, nous avons réalisé un échantillonnage de sol à Gedinne (site de FORBIO, effet de la diversité des essences). Après un examen attentif des différentes options d'échantillonnage, des espèces d'arbres à prendre en compte et de leur importance pour la recherche dans le cadre du plan quinquennal, nous avons ciblé 4 essences : hêtre, chêne, mélèze et douglas. Nous avons échantillonné le sol sous chaque monoculture de ces espèces et sous les mélanges de toutes les combinaisons possibles de 2 espèces d'arbres, ainsi que sous la combinaison de trois espèces (hêtre, chêne, douglas). Nous avons obtenu ainsi 11 combinaisons à tester : hêtre, chêne, douglas, mélèze ; hêtre x chêne, hêtre x douglas, hêtre x mélèze, chêne x douglas, chêne x mélèze, douglas x mélèze et hêtre x chêne x douglas ; avec 6 répétitions pour chaque combinaison, pour un total de 66 échantillons. Ce pool de 4 espèces dans notre plan d'échantillonnage nous permettra de 1) étudier les feuillus et conifères présentant un intérêt économique et écologique, avec une espèce en commun avec l'échantillonnage précédent (le hêtre) ; 2) étudier l'effet de la richesse spécifique (de 1 à 3) et l'effet des essences sur les indicateurs de la qualité du sol.

Après la visite du dispositif FORBIO à Gedinne, avec le Prof. Quentin Ponette (responsable de la gestion scientifique du site), nous avons sélectionné le site de Gouverneur et décidé de considérer chacune des petites parcelles de 3 x 3 arbres (chaque arbre est distant de 1,5 m)

comme unité expérimentale. Plus précisément, pour les monocultures, nous avons prélevé 3 échantillons, sur une surface délimitée par un cadre de 25 cm de côté, pour en faire un échantillon composite au centre d'une parcelle de 3 x 3 arbres de la même essence. Nous avons répété cette opération dans six parcelles choisies au hasard (mais dont les 9 arbres étaient tous vivants). Pour les mélanges de 2 espèces, nous avons prélevé de la même manière à l'intersection de deux parcelles des essences concernées. Pour le mélange des trois essences (hêtres x chênes x douglas), nous avons prélevé au centre de 4 parcelles ; une essence était donc présente 2 fois parmi ces 4 parcelles (maximum deux fois pour les 6 échantillons).

Pour chaque échantillon nous avons retiré délicatement la litière fraîche et pris la couche d'horizon organique. La hauteur de cette couche était variable et elle a été mesurée pour chaque échantillon.

Pour les 66 échantillons les analyses suivantes ont été réalisées :

- Le  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$
- 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)
- Cations échangeables ( $\text{BaCl}_2$ )

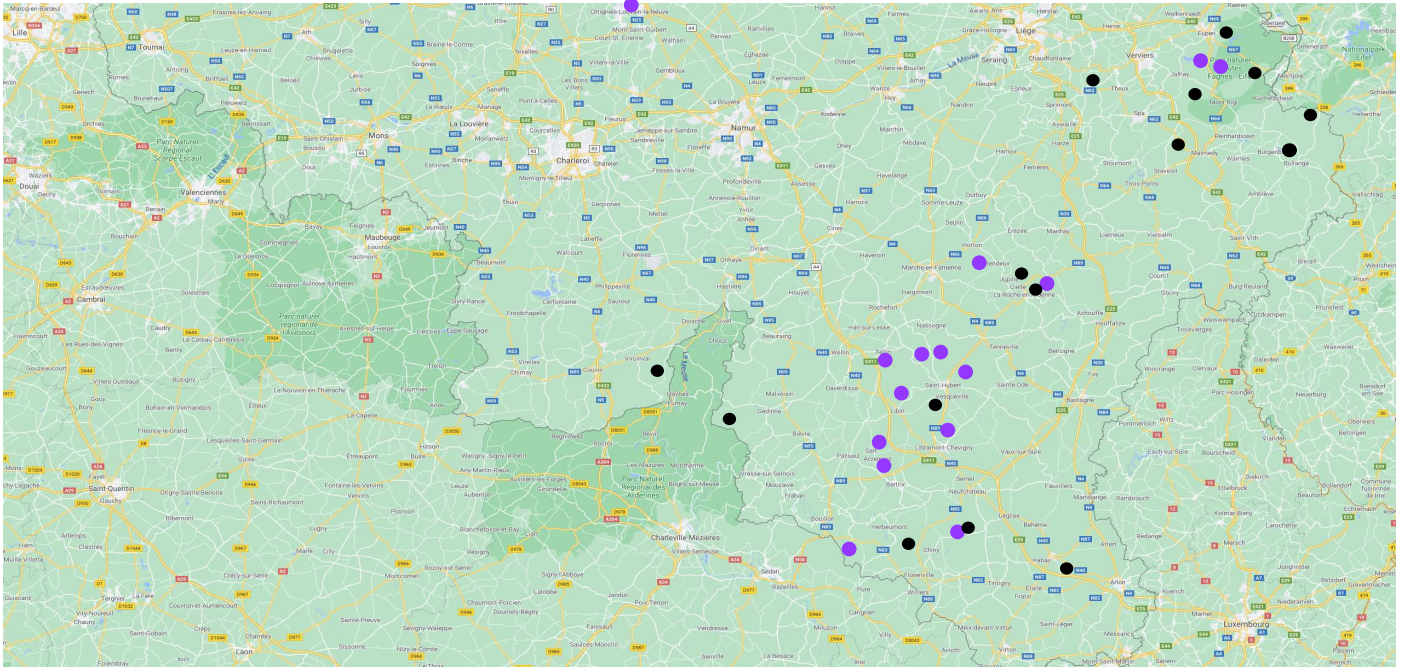
### **B.2.2.2. Matériel et méthodes - qualité biologique des sols sous hêtre et épicéa**

Trente sites ont été échantillonnés entre le 6 et le 19 novembre 2020, majoritairement dans les Ardennes (Fig. 4, tableau 1). 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 avec une tarière de 8 cm de diamètre ont été prélevés (le premier au centre de la placette, ensuite à 2 m du centre vers le Nord, puis 4 m vers l'Est, 6 m vers le Sud, 8 m vers l'Ouest et enfin 10 m vers le Nord). 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 (organique et les 10 premiers centimètre du minéral (Ah/B)). Les échantillons ont été tamisés à 4 mm sur un tamis stérilisé. Pour les mesures nécessitant une incubation (respiration potentielle, minéralisation nette de l'azote, potentiel métabolique), le sol a été ajusté à 60% de la capacité au champs (WHC, voir ci-dessous).

Les 60 échantillons ont été analysés pour:

- Le  $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$  et  $\text{pH}_{\text{KCl}}$
- 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)
- Cations échangeables ( $\text{BaCl}_2$ )

Des sous-échantillons ont été lyophilisés et stockés pour des analyses éventuelles de biodiversité microbienne moléculaire (si moyens humains complémentaires i.e. mémorant, doctorant).



**Fig. 4 : situation géographique des 30 sites échantillonnés en novembre 2020 ; les points mauves sont les sites sous hêtre, les noirs sous épicéa.**

Tableau 1 : Sites échantillonnés, numéros de carreaux IGN (CAROIGN), numéros des placettes (CARONPL), réseau (IPRFW : placettes du réseau de l’Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie, ICP-Forests : placettes du réseau ‘International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests’), le lieu du triage, le nom du cantonnement, l’essence dominante sur le site, le numéro de la classe typologique (Ponette et al., 2018), le sigle pédologique, le type d’humus et la classe de risque nutritionnel (Ponette et al., 2020).

Num. éch.	CAROIGN	CARONPL	Réseau	Espèce	Triage	Classe Typologique	Sigle pédologique	Risque Mg / P
1	6812	234	IPRFW	Epicéa	Anlier	12	Gbbfi0_1	Très faible
2	6734	138	IPRFW	Epicéa	Epioux Sud	12	Gbbfi2	Très faible
3			ICP-Forests	Epicéa	Boquillons	12	Gbbz	Très faible
4	6812	34	IPRFW	Hêtre	Suxy	12	Gbbfi0_1	Très faible
5			ICP-Forests	Epicéa	Willerzie	14	Gbbfi0_1	Modéré
6	4278	138	IPRFW	Epicéa	Louveigné	19_20	Gbbr2	Elevé
7	5056	102	IPRFW	Epicéa	Stavelot	14	Gbbf2(q)	Modéré
8	5012	142	IPRFW	Epicéa	Jalhay	21	Gbbr2	Modéré
9	4356	234	IPRFW	Hêtre	Herto MF	21	Gbbr5	Modéré
10	4356	154	IPRFW	Hêtre	Herto Gileppe	14	Gbbf4	Modéré
11	5078	166	IPRFW	Epicéa	Tanneck	12	Gbbfi2	Très faible
12	5034	270	IPRFW	Epicéa	Dickelt	12	Gbbfi0_1	Très faible
13	4378	58	IPRFW	Epicéa	Alt-Hatlich	21	Gbbr2	Modéré
14	4356	262	IPRFW	Epicéa	Eupen	20	Gbbrb4	Elevé
15	5556	298	IPRFW	Epicéa	Bérismenil	19_20	Gbbr0_1	Elevé
16			ICP-Forests	Epicéa	La Roche	20_21	Gbbr2	Modéré
17	5556	30	IPRFW	Hêtre	Rendeux	17_18	Gbbr2	Modéré
18	5578	58	IPRFW	Hêtre	Bérismenil	19	Gbbr2	Elevé
19	5978	310	ICP-Forests	Hêtre	Rouge-Ponce	19	Gbbr0_1	Elevé
20	5978	222	IPRFW	Hêtre	Mormont 1	19	Gbfr2	Elevé
21	5978	142	IPRFW	Hêtre	Mormont 2	18	uGbbr2	Elevé
22			ICP-Forests	Hêtre	Wavre	7	(x)Lba	Modéré
23	5856	194	IPRFW	Epicéa	Marebwais	15	Ghx0_1	Elevé
24	6434	274	IPRFW	Hêtre	Bras	14	Gbbfi0_1	Modéré
25	6434	102	IPRFW	Hêtre	Libin Haut	13	Gbbfi2	Très faible
26	6478	22	IPRFW	Hêtre	Jehonville	12	Gbb0_1	Très faible
27	6478	30	IPRFW	Hêtre	Jehonville	12	Gbbfi2	Très faible
28	6712	218	IPRFW	Hêtre	Quatre Chemins	12_13	Gbbfi0_1	Très faible
29			ICP-Forests	Hêtre	Tellin	19	Gdbr0_1	Elevé
30	6434	206	IPRFW	Epicéa	Vesqueville	20	Gbbr0_1	Elevé



## **La capacité au champ (WHC)**

La capacité au champ a été mesurée par une méthode volumétrique (WHC, Haines-funnel system, Jenkinson and Powlson, 1976) dans laquelle 25 g du sol frais sont saturés par ajout de 50 ml d'eau pendant 30 min.

## **La teneur en eau et en matière organique du sol**

Comme nos résultats analytiques sont exprimés par rapport au poids sec du sol, il est indispensable de connaître la teneur en eau du sol. Le taux d'humidité gravimétrique a été déterminé par la différence de poids de 5 g de sol frais séchés à 105°C pendant minimum 3 heures. La matière organique du sol (MOS) a été déterminée, sur des échantillons séchés au four, par perte au feu à 450°C pendant une nuit, et la quantité totale de carbone organique a été calculée comme étant égale à 58 % de la MOS.

## **pH du sol**

Les mesures de pH ont été prises selon la norme ISO 10390 avec un pH-mètre (HANNA INSTRUMENTS HI 2550 pH/ORP) dans une solution de 20 ml de sol frais portée à 100 ml avec du CaCl<sub>2</sub> 0.1M, après 30 minutes. La sonde en verre a été agitée dans la solution lors de la prise de mesure (International Organization for standardization, 1994).

Le pH KCl des échantillons a été mesuré selon la norme ISO 10390. Pour cela, 80 ml d'une solution de KCl 0,1M ont été ajoutés à 15 g de sol frais. Le mélange a ensuite été agité 1h à 180 rpm et laissé au repos 30 minutes avant que le pH ait été pris avec un pH-mètre (HANNA INSTRUMENTS HI 2550 pH/ORP) en tournant légèrement la sonde en suspension dans la solution.

## **La minéralisation nette de l'azote (Nmin) et nitrification relative**

Cette méthode mesure la minéralisation nette de l'azote (production d'azote minéral) à humidité et température constantes. La minéralisation nette est mesurée par la production de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pendant 28 jours à 20°C. Le contenu en N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> est analysé par colorimétrie avec un auto-analyseur (Auto-Analyzer 3, Bran + Luebbe, Allemagne) après extraction du sol avec une solution de KCl à 1M (15 g de sol frais agité pendant 1 heure à 180 tours par minute).

La minéralisation nette est évaluée en calculant la différence entre les valeurs d'azote minéral dans le sol après et avant l'incubation. Le résultat est exprimé en mg N kg<sup>-1</sup> sol sec jour<sup>-1</sup>.

La nitrification relative est le rapport de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> produits / Nmin \* 100. Elle est exprimée en pourcent.

## **La respiration potentielle (C-CO<sub>2</sub>) :**

La mesure de la respiration est un indice de l'activité des organismes hétérotrophes. Ces derniers ont besoin carbone organique pour leur métabolisme. Le produit de leur métabolisme est le CO<sub>2</sub> et sa production reflète leur degré d'activité.

La respiration potentielle est mesurée par la production de CO<sub>2</sub> au cours d'une incubation de 3h de 20 g de sol frais à 20°C. La vitesse de production de CO<sub>2</sub> (exprimée en µg de C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> de sol sec h<sup>-1</sup>) est calculée à partir de la régression linéaire des concentrations en C-CO<sub>2</sub> en fonction du temps.

### **La biomasse microbienne (C<sub>mic</sub>, N<sub>mic</sub> et P<sub>mic</sub>)**

La fumigation au chloroforme tue les micro-organismes et provoque la libération des constituants microbiens. Pour estimer la taille de la biomasse microbienne du sol on soustrait le contenu des extraits avant fumigation (teneur en C, en N et en P du sol) des extraits après la fumigation (teneur en C, en N et en P du sol + C, N et P en provenance de la lyse des cellules).

Pour le C<sub>mic</sub> et le N<sub>mic</sub>, chaque échantillon de sol est réparti en deux aliquotes ; l'un est directement soumis à une extraction au K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5M, l'autre est incubé pendant trois jours et fumigé avec du chloroforme sans éthanol avant d'être également soumis à l'extraction.

La biomasse microbienne (C<sub>mic</sub>) est déterminée en soustrayant le contenu en carbone organique (mesuré avec analyseur de carbone organique total par infrarouge, Analytik Jena multi N/C 3100) des extraits des échantillons fumigés de celui des non fumigés. Cette valeur indique la quantité en carbone libérée lors de la lyse des micro-organismes. Elle est ensuite divisée par un facteur de correction (kEC = 0,45) (Beck et al., 1997) qui dépend des propriétés du sol. La valeur du facteur de conversion représente la fraction de carbone microbien libérée lors de l'incubation sous chloroforme. Elle est nécessaire pour convertir la quantité de carbone mesurée en biomasse microbienne. C<sub>mic</sub> est exprimé en mg C kg<sup>-1</sup> sol sec.

La teneur en azote dans la biomasse microbienne (N<sub>mic</sub>) est déterminée en soustrayant le contenu en azote organique (mesuré avec analyseur d'azote organique total, Analytika Jena multi N/C 3100) des extraits des échantillons fumigés de celui des non fumigés. Cette valeur est ensuite multipliée par un facteur de correction (kEN = 0.54 ;Brookes et al., 1985) qui dépend des propriétés du sol et qui représente la fraction d'azote microbien libérée lors de l'incubation. Elle est exprimée en mg N-Ntot kg<sup>-1</sup> sol sec.

Pour déterminer le phosphore microbien du sol (P<sub>mic</sub>, mg kg<sup>-1</sup>), la fumigation au chloroforme est suivie d'une extraction au NaHCO<sub>3</sub> 0.5 M (Brookes et al., 1982). La teneur en phosphore dans la biomasse microbienne (P<sub>mic</sub>) est déterminée en soustrayant le contenu en P mesuré avec une ICP (5110 ICP-OES Agilent Technologies) des extraits des échantillons fumigés de celui des non fumigés. Cette valeur est ensuite multipliée par un facteur de correction de 0,4 (Brookes et al., 1982).

### **Le quotient métabolique (qCO<sub>2</sub>)**

Le quotient métabolique est un indicateur de l'activité microbienne et de la vitesse du turnover du carbone. Ce quotient permet une comparaison directe de l'efficacité de l'utilisation des substrats par les micro-organismes dans différents sols. Il représente le rapport entre la quantité de C-CO<sub>2</sub> produite par la respiration du sol et la quantité de C<sub>mic</sub> contenue dans celui-ci. Une grande efficacité à utiliser le substrat est donnée par une valeur faible du qCO<sub>2</sub>. Le quotient métabolique du CO<sub>2</sub> est exprimé en µg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> C<sub>mic</sub><sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> (Knoepp et al., 2000).

## **Le quotient microbien (qmic)**

Le quotient microbien est le rapport entre la quantité de carbone microbien et la quantité de carbone total du sol. Il rend compte de la qualité de la matière organique du sol (pour les microorganismes) et des changements de processus dans les sols. Il permet de comparer plusieurs sols ou de suivre leurs évolutions au cours du temps.

## **Le carbone et l'azote labiles**

Le contenu du sol en C et N labile a été mesuré après extraction à l'eau froide de 5 g de sol frais par 30 ml d'eau distillée pendant 30 minutes (Ghani et al., 2003), suivi d'une centrifugation du mélange pendant 10 minutes à 4000 rpm et filtration sur disque 0.45  $\mu$ . Pour l'extraction à l'eau chaude, la phase solide a ensuite été remise en solution avec 30 ml d'eau distillée et agitée 30 minutes à 120 rpm avant d'être incubée une nuit à 80°C et d'être à nouveau agitée 10 minutes (120 rpm), centrifugée 10 minutes (4000 rpm) et filtrée sur disque. Les filtrats de l'extraction d'eau froide et d'eau chaude ont été analysés avec un analyseur TOC Analytik Jena multi N/C 3100.

## **L'indice de potentiel métabolique des micro-organismes du sol (MSIR : multiple substrat induced respiration)**

L'indice de potentiel métabolique des micro-organismes du sol (précédemment appelé diversité fonctionnelle ou métabolique) peut être défini comme le nombre de substrats utilisable par la communauté microbienne et la vitesse à laquelle ces substrats sont utilisés. Cet indice serait plus pertinent que la diversité génétique ou structurelle pour la stabilité à long terme des écosystèmes et peut donc être employée comme indicateur de la qualité du sol. L'indice de potentiel métabolique peut être étudié par l'analyse des profils physiologiques via les profils d'utilisation de sources uniques de carbone. Cette méthode fournit des informations sur les fonctions métaboliques du sol dans leur ensemble plutôt que sur une fonction spécifique. Le protocole de MicroResp<sup>TM</sup> a été utilisé. Cette méthode de colorimétrie permet de mesurer la production de CO<sub>2</sub> de plusieurs échantillons de sol simultanément en réponse à l'ajout d'un substrat carboné. Nous avons sélectionné comme substrats carbonés deux sucres (D(+) Glucose, D(+) Galactose), deux acides aminés (acide 4-aminobutyrique, L-Alanine), deux acides carboxyliques (acide citrique ; acide  $\alpha$ -cétoglutarique) et du N-Acetyl D-Glucosamine. Le CO<sub>2</sub> émis lors de la respiration des micro-organismes acidifie le gel d'une plaque de détection provoquant un changement de couleur proportionnel à la quantité de CO<sub>2</sub> dégagée. La densité optique à 570 nm est mesurée pour chaque puits avec un spectrophotomètre SynergyMx (Biotek) afin de déterminer cette quantité de CO<sub>2</sub> émise.

## **Cations échangeables**

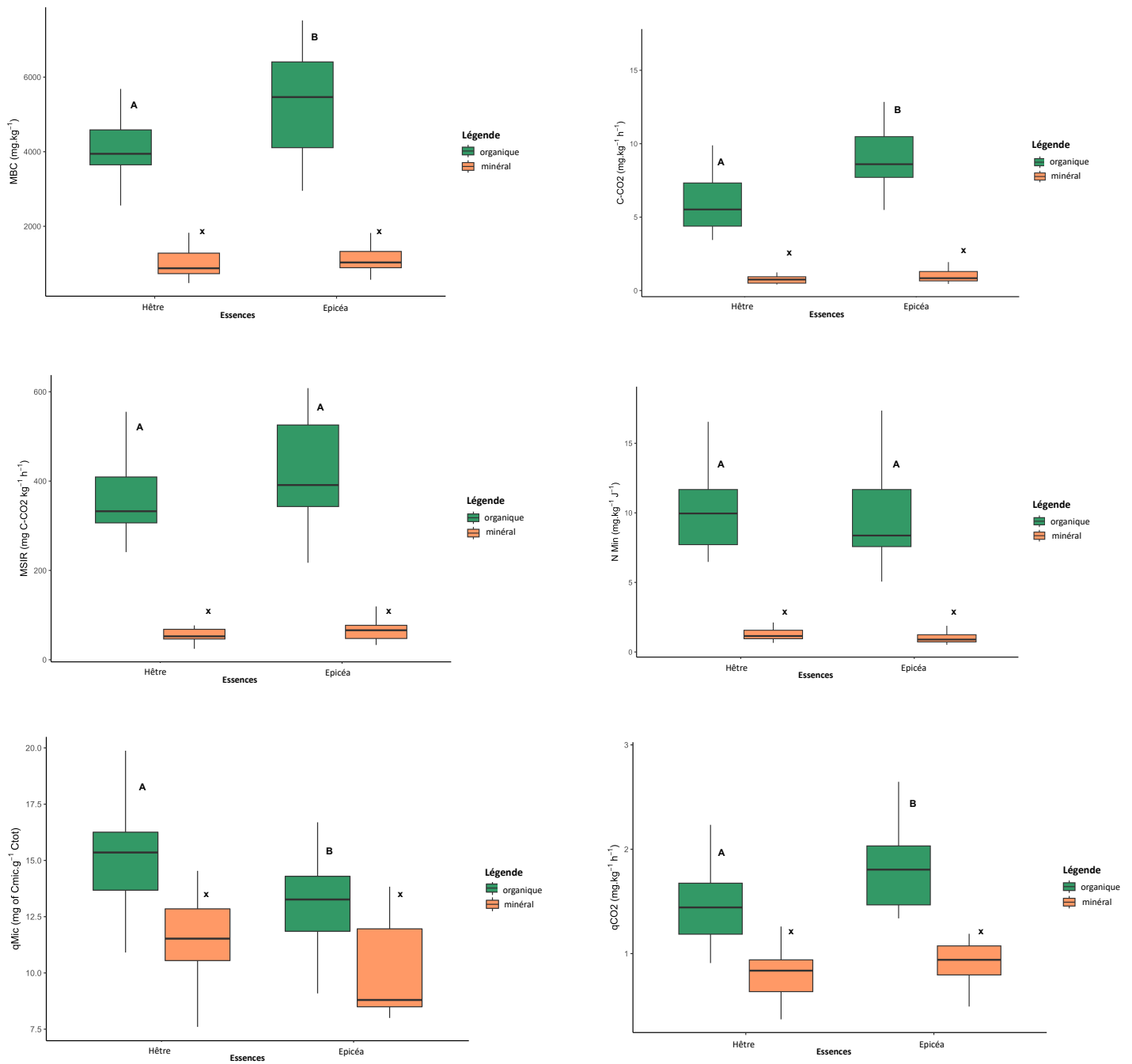
Les cations échangeables ont été extraits au BaCl<sub>2</sub> (Campbell et al., 2003) avec 4 g de sol frais et 40 ml d'une solution de BaCl<sub>2</sub> à 0.1 M, agités pendant 2h à 120 rpm et centrifugés 10 minutes à 4000 rpm (Hendershot & Duquette, 1986). Les extraits ont ensuite été filtrés avec des filtres Whatman 42 de 150 mm de diamètre, préalablement rincés avec 20 ml de BaCl<sub>2</sub>. Les extraits filtrés ont été acidifiés à 1% avec de l'acide nitrique 'suprapur', avant analyse par

spectrométrie d'émission atomique avec une ICP (5110 ICP-OES Agilent Technologies). La somme des bases échangeables représente la somme pour le  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  ( $\text{cmolc kg}^{-1}$ ) (Ross & Ketterings, 1995).

### **Analyses statistiques**

Les effets des espèces (hêtre vs épicéa) et des horizons (organique vs minéral) sur les indicateurs biologiques des sols ont été analysés avec une ANOVA 2 pour résultats des 30 placettes échantillonnées. Comme l'interaction 'espèces / horizons' était significative pour la majorité des indicateurs biologiques, nous avons séparé les analyses et réalisé des T-tests pour étudier les différences entre les deux essences dans chacun des deux horizons séparément.

### B.2.2.2. Résultats - qualité biologique des sols sous hêtre et épicéa



**Figure 5 : Carbone microbien (biomasse microbienne) (MBC) (mg kg<sup>-1</sup>), potentiel de respiration (C-CO<sub>2</sub>) (mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), indice de potentiel métabolique des micro-organismes du sol (MSIR : multiple substrat induced respiration) (mg C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), minéralisation nette de l'azote (N<sub>min</sub>) (mg kg<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup>), quotient microbien (qMic) (mg de Cmic g<sup>-1</sup> de Ctot), et quotient métabolique (qCO<sub>2</sub>) (mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) dans le sol des deux horizons sous hêtre et épicéa. La ligne en gras dans la boîte à moustache représente la médiane, les bords supérieurs et inférieurs du rectangle le premier et troisième quartile, et les extrémités des moustaches 1,5 fois l'espace interquartile (n=15). Des lettres majuscules différentes indiquent des différences significatives (p < 0.05) entre les deux essences dans l'horizon organique et les lettres en minuscules dans l'horizon minéral.**

Dans l'horizon minéral, il n'y a pas de différences significatives sous hêtre et épicéa, pour les 6 indicateurs présentés (fig. 5).

Dans l'horizon organique, la biomasse microbienne du sol (MBC) est significativement plus élevée sous épicéa ( $5298 \text{ mg C}_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1}$ ) que sous hêtre ( $4048 \text{ mg C kg}^{-1}$ ). La respiration potentielle est également plus élevée sous épicéa que sous hêtre ( $9.65$  et  $5.84 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). L'indice de potentiel métabolique (MSIR), la somme des respirations induites des 7 substrats carbonés sélectionnés, et la minéralisation nette de l'azote ne sont pas significativement différentes entre les deux essences. Sous épicéa, le quotient métabolique ( $q_{\text{CO}_2}$ ) plus élevé ( $1.84$  et  $1.45 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) et le quotient microbien ( $q_{\text{mic}}$ ) plus faible ( $13.1$  et  $15.01 \text{ mg C}_{\text{mic}} \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{tot}}$ ) indiquant que la matière organique disponible pour les micro-organismes serait de meilleure qualité hêtre.

Nos résultats confirment l'importance de l'horizon organique pour le turnover de la matière organique. La biomasse microbienne y est en moyenne 5 fois plus élevée par rapport à l'horizon minéral. Aussi, la majorité des différences entre les sites peuplés d'épicéa ou de hêtre sont observées dans l'horizon organique. Dans l'horizon organique, la biomasse microbienne et l'activité microbienne (respiration potentielle et potentiel métabolique) sont plus élevées sous les épicéas. La biomasse microbienne plus élevée sous épicéa, pourrait être liée à la disponibilité en substrats carbonés, plus importante. Cependant, un quotient métabolique plus élevé et un quotient microbien plus faible sous épicéa, indiquent que la matière organique disponible pour les micro-organismes serait de meilleure qualité sous hêtre.

### **B2.3. Gérer les bases de données**

Dans la subvention précédente, un travail conséquent avait 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. Ce travail très conséquent a été finalisé lors de cette subvention. La base de données a été vérifiée intégralement et elle est maintenant à jour pour les données acquises depuis 1990 jusque fin 2022. Actuellement, la base de données unique comporte 1.784.680 entrées.

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

#### **B.2.3.1. Analyse de l'évolution à long terme des dépôts en substances acidifiantes et eutrophisantes**

L'analyse statistique des séries temporelles de l'évolution à long terme des dépôts en substances acidifiantes et eutrophisantes est en cours et nous disposons déjà des analyses de l'évolution au cours du temps des différents éléments analysés pour les collecteurs suivants : pluies à découvert, pluviolessivats et eaux à l'exutoire (voir ci-dessous). En bref, les analyses statistiques permettent de quantifier une éventuelle tendance significative au cours du temps et d'identifier des moments auxquels il y a eu un changement significatif dans la tendance.

#### **Analyses statistiques**

##### **Test de tendance :**

Le test de tendance de Mann-Kendall (voir Mann (1945)) est un test non paramétrique permettant de détecter une tendance monotone dans une série de données. Soit  $X_1, \dots, X_n$  une série de variables aléatoires ordonnées chronologiquement. La statistique du test de Mann-Kendall est

$$S = \sum_{i < j} \text{sign}(X_j - X_i), \quad (1)$$

où  $\text{sign}$  est défini par

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0, \\ 0 & \text{si } x = 0, \\ -1 & \text{si } x < 0. \end{cases}$$

Autrement dit, chaque observation est comparée aux observations qui la précèdent. Si la différence est positive, la statistique de test est augmentée d'une unité, si la différence est nulle la statistique reste inchangée, et enfin si la différence est négative la statistique est diminuée d'une unité.

La version de ce test proposée par Hirsch & Slack (1984) permet de tenir compte de la saisonnalité d'une série en ne comparant que les observations appartenant à une même saison. La statistique de test devient alors

$$S' = \sum_{g=1}^p S_g, \quad (2)$$

où  $p$  est le nombre de saisons et où  $S_g$  est la statistique de test (1) calculée sur la sous-série ne comportant que les observations de la saison  $g$ . Par ailleurs, la dépendance entre les saisons est prise en compte dans le calcul de la variance de la statistique du test. Ce test permet donc de détecter une tendance monotone, qu'elle soit linéaire ou non.

En revanche, les observations d'une même saison sont supposées indépendantes entre elles, c'est l'hypothèse d'*indépendance intra-saisons*. Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, le test ne peut pas être appliqué.

Enfin, ce test ne permet de détecter une tendance que si elle est homogène entre les saisons. En effet, si certaines saisons présentent une tendance à l'augmentation alors que d'autres présentent une tendance à la diminution, les valeurs positives et négatives des statistiques saisonnières vont se compenser lors du calcul de la statistique de test  $S'$  et le test conclura alors à l'absence de tendance.

### **Points de rupture :**

Le test de tendance présenté ci-dessus permet de détecter une tendance monotone. Mais si des changements interviennent au cours de la série, par exemple une augmentation suivie d'une diminution, le test conclut à l'absence de tendance. Dès lors, afin de déterminer ces éventuels changements, l'algorithme BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) proposé par Verbesselt et al. (2010) est utilisé. Cette technique décompose la série  $X_t$  en une somme de trois composantes : une composante *tendancielle*  $T_t$ , une composante *saisonnière*  $S_t$  et une composante *résiduelle*  $\mathcal{E}_t$ , aussi appelée *erreur*.

$$X_t = T_t + S_t + \mathcal{E}_t, \quad t = 1, \dots, n.$$

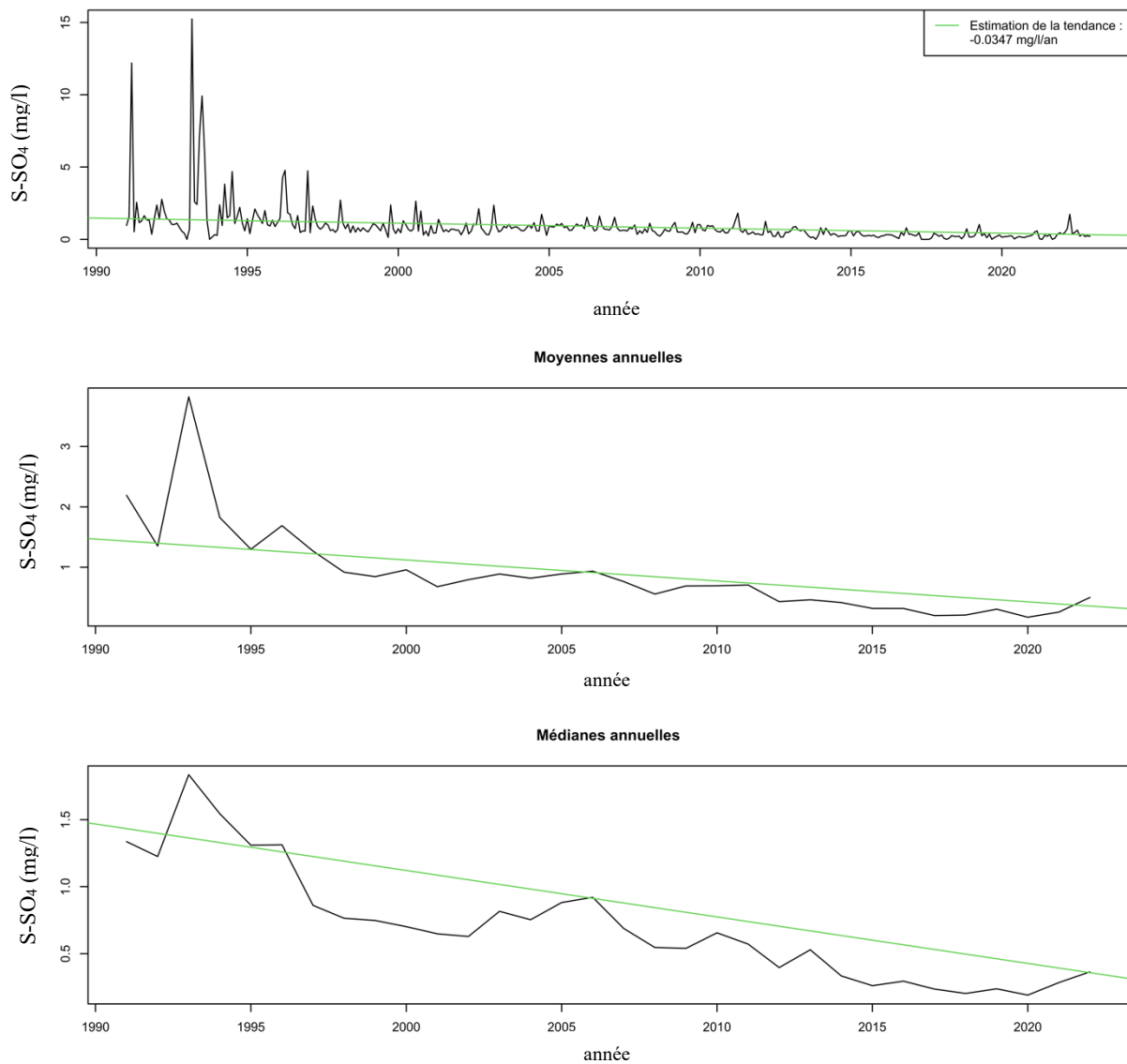
Les composantes tendancielle et saisonnière sont alors estimées de manière itérative. Elles sont soumises à un test OLS-MOSUM (Ordinary Least Squares residuals-based MOving SUM) afin de déterminer si un ou plusieurs points de rupture sont présents dans ces composantes (voir Zeilis (2005)). Si ce test est positif, le nombre de points de rupture et les dates correspondantes sont estimés grâce à la méthode de Bai & Perron (2003). Les détails de l'algorithme itératif sont expliqués par Verbesselt et al. (2010). Les auteurs présentent également les trois classes de changement existantes et leur interprétation biologique.

Ces analyses ont été effectuées sur les séries des pluies à découvert et des pluiolessivats sous épicéas de plus de 60 ans ainsi que celles des eaux à l'exutoire des bassins versants de la Robinette et de Waroneu sur les concentrations pondérées par le volume des éléments suivants : N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, pH, S-SO<sub>4</sub>. Toutes les séries s'étalent de janvier 1992 à décembre 2022. Tandis que les séries concernant les pluies à découvert sont des séries mensuelles, les séries des eaux à l'exutoire sont des séries bimensuelles.

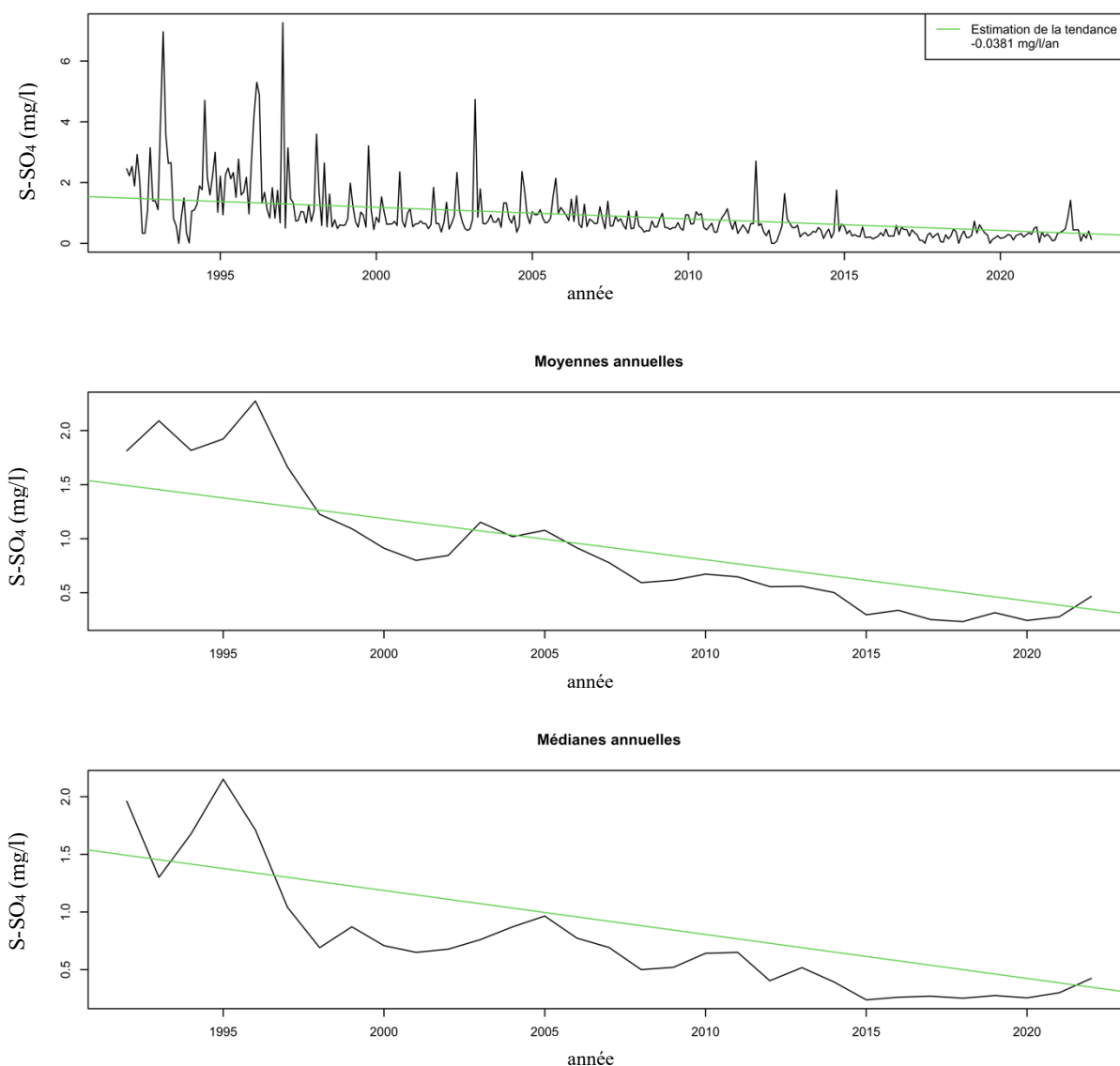


## Dépôts acidifiants et eutrophisants :

- Dans les pluies à découvert

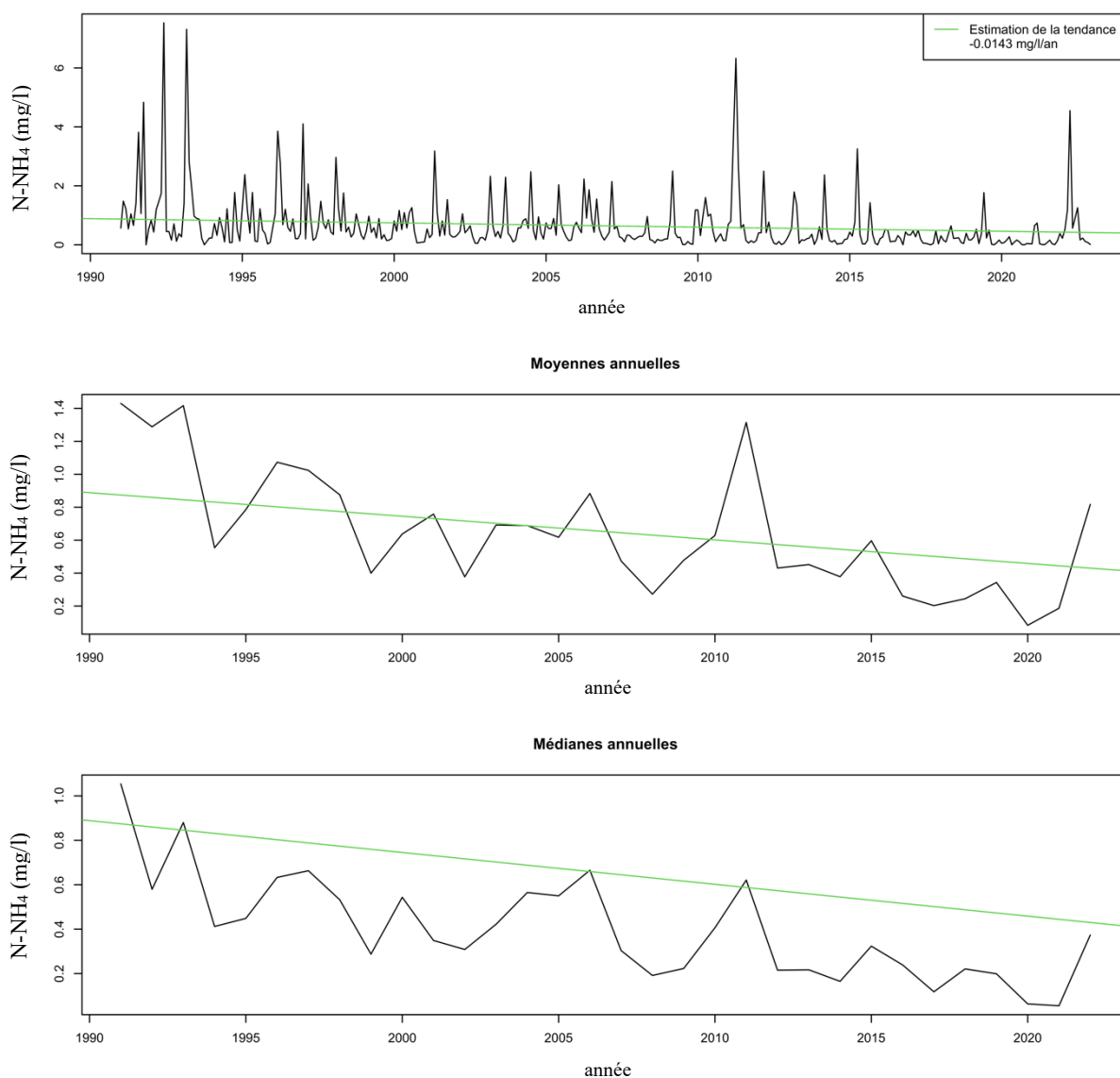


**Figure 6 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

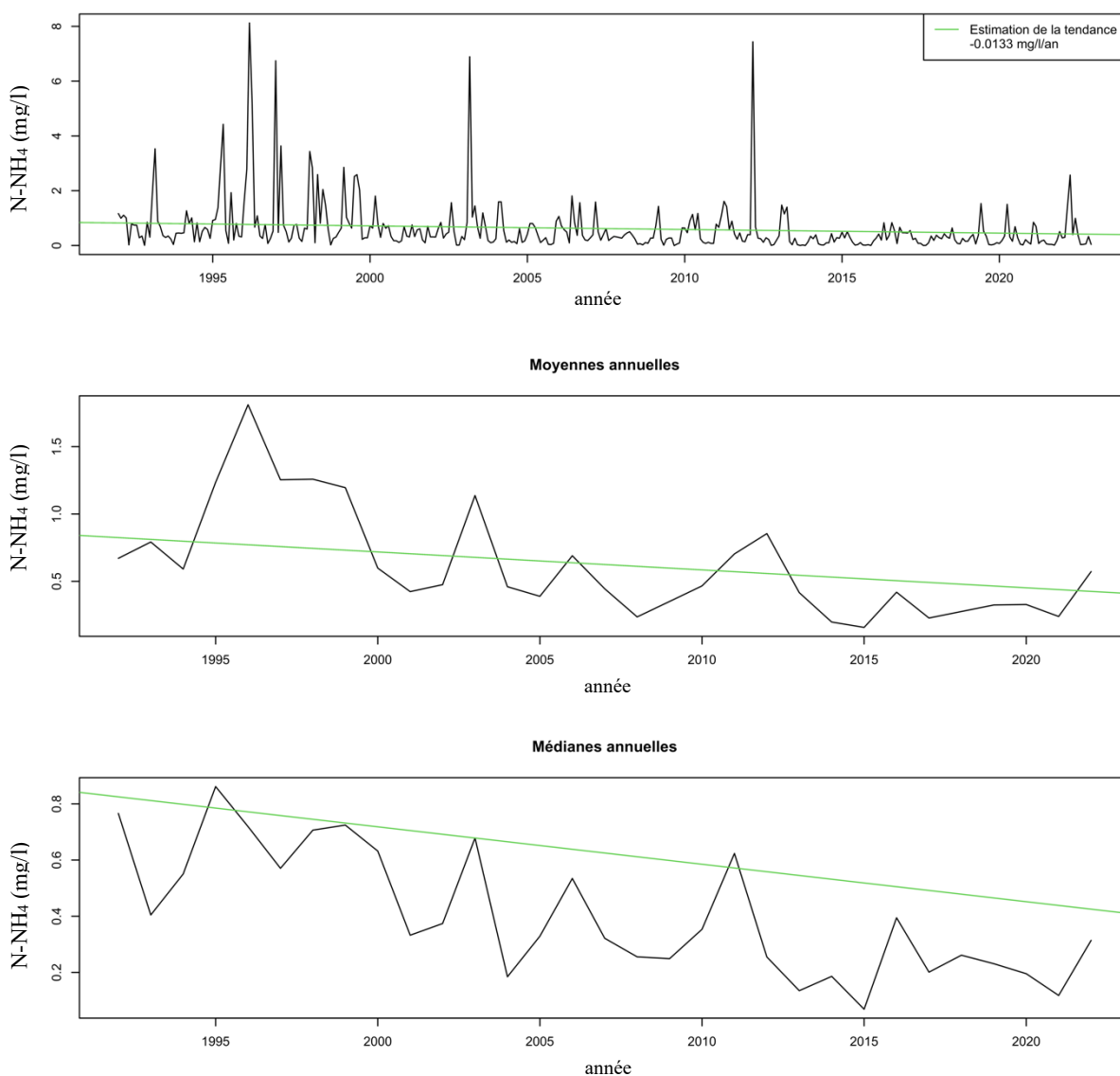


**Figure 7 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Dans les pluies à découvert (entrées) les concentrations en sulfates pondérées par le volume diminuent de façon significative dans les deux bassins versants (fig. 6 et 7), avec des tendances calculées de -0,0347 et -0,0381 mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu, respectivement. Cela correspond à une diminution des concentrations en S-SO<sub>4</sub> de 1,1 mg l<sup>-1</sup> et 1,2 mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.

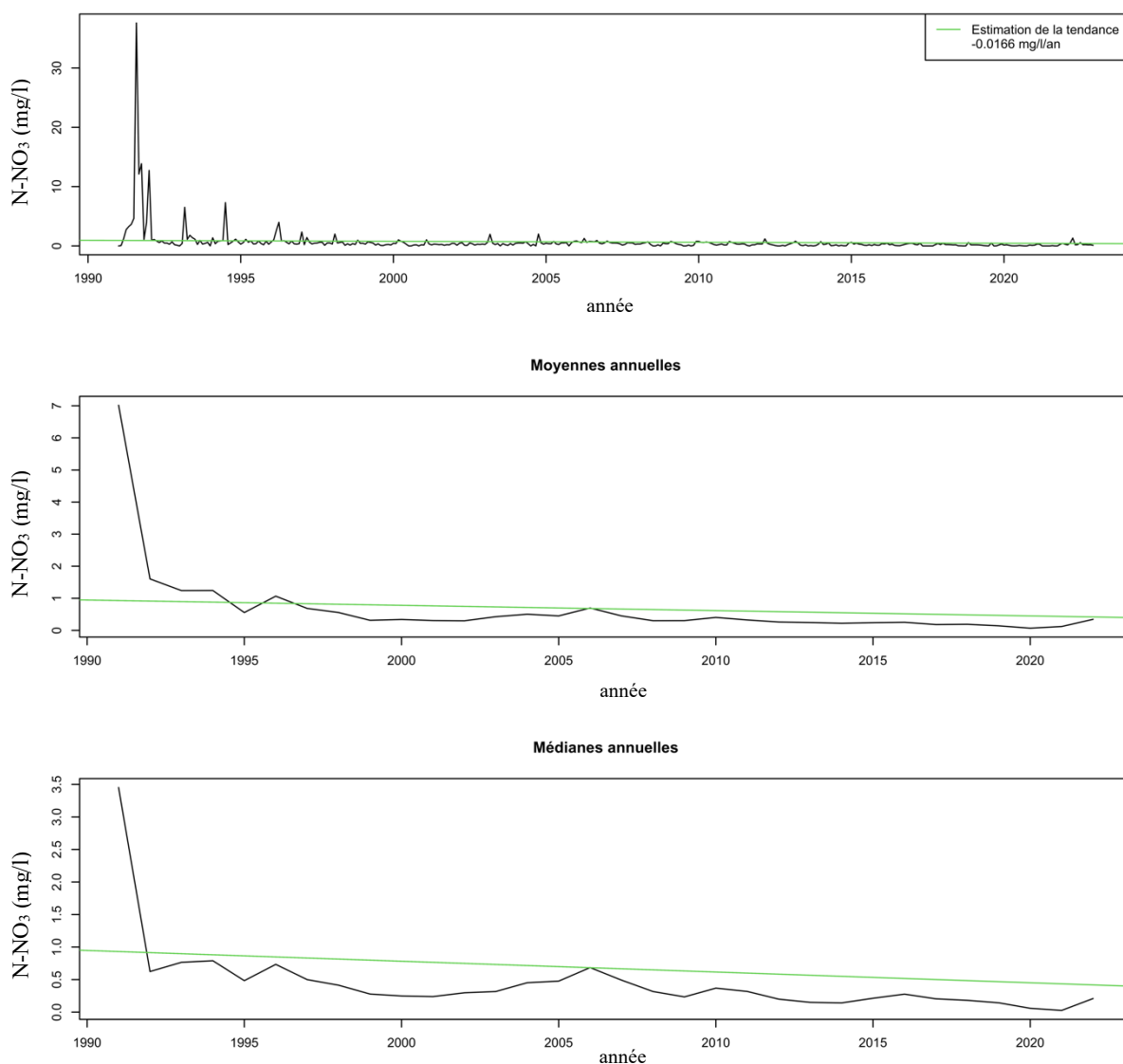


**Figure 8 : moyennes des concentrations en N-NH<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

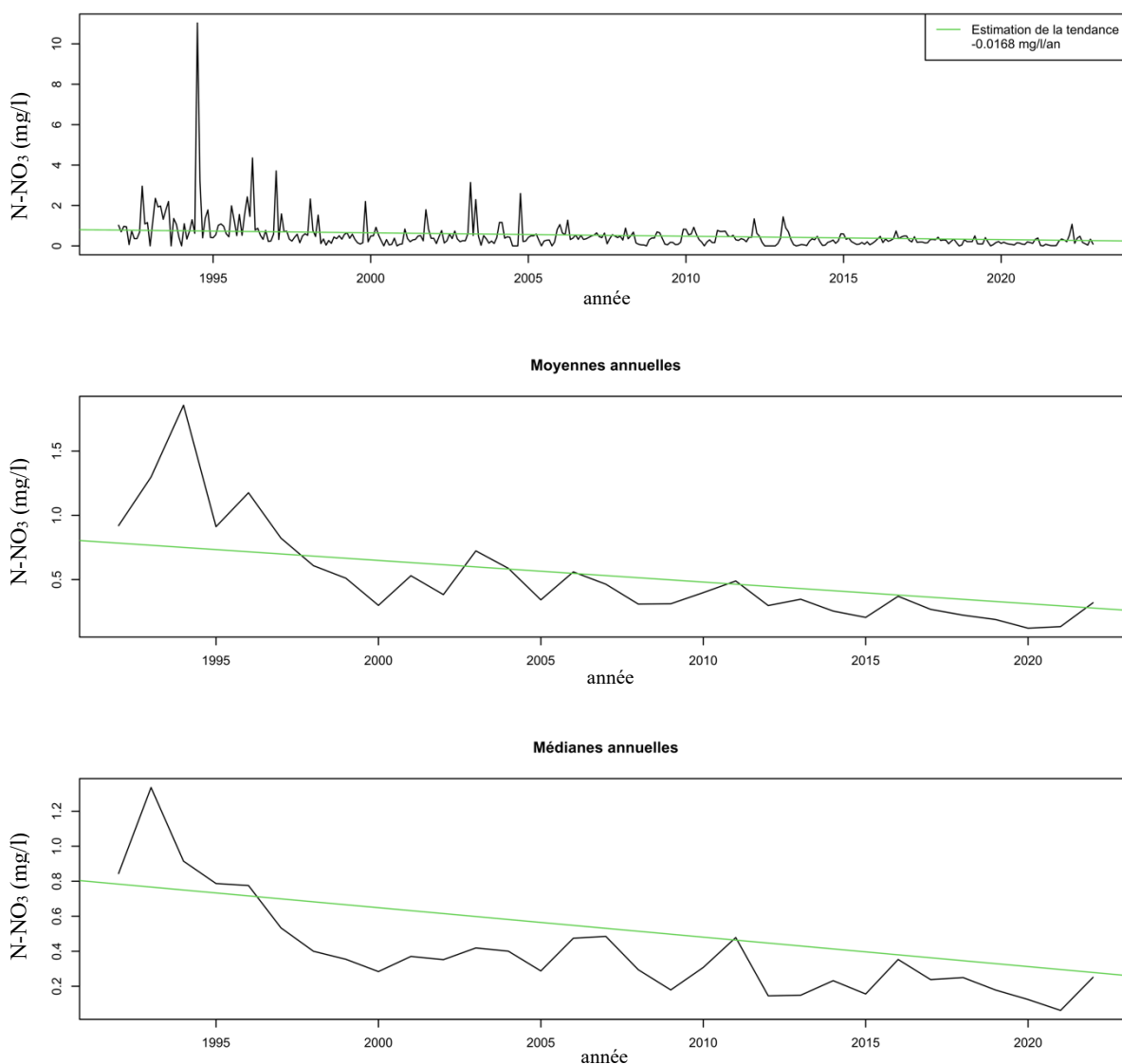


**Figure 9 : moyennes des concentrations en N-NH<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Dans les pluies à découvert, nous observerons une diminution significative des concentrations en ammonium pondérées par le volume dans les pluies à découvert (entrées) dans les deux bassins versants (fig. 8 et 9). Les tendances calculées sont respectivement de -0,0143 et -0,0133 mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une diminution des concentrations en N-NH<sub>4</sub> de 0,46 mg l<sup>-1</sup> et 0,43 mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.

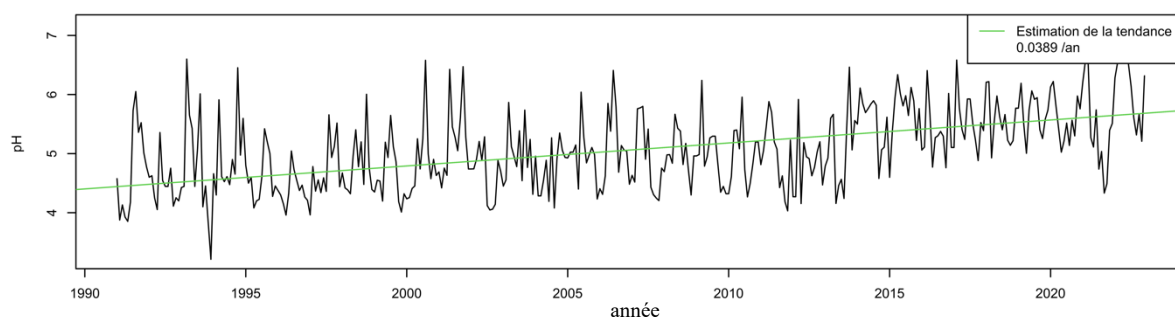


**Figure 10 : moyennes des concentrations pondérées en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

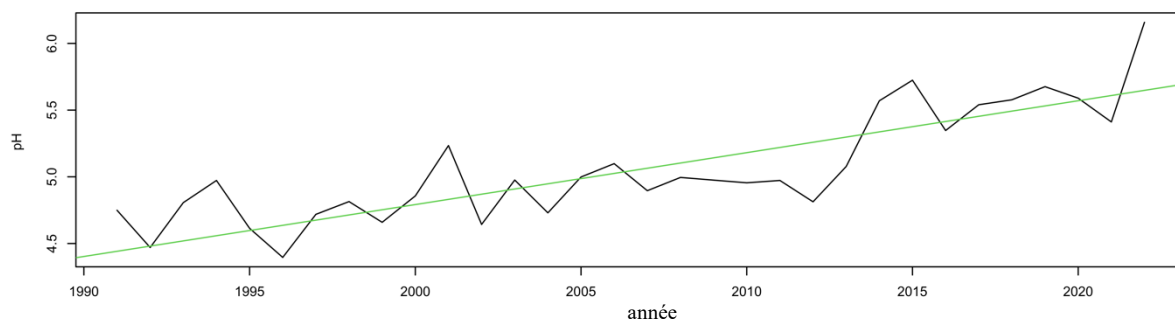


**Figure 11 : moyennes des concentrations en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

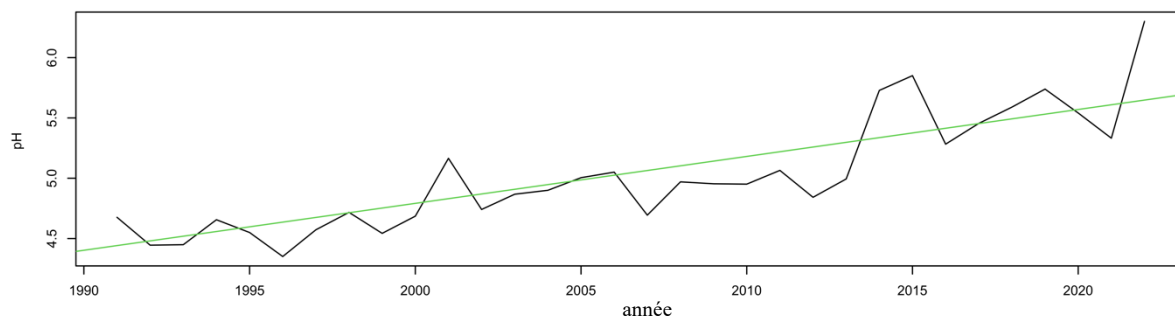
Nous observerons également une diminution significative des concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les pluies à découvert (entrées) dans les deux bassins versants (fig. 10 et 11). Les tendances calculées sont respectivement de  $-0,0166$  et  $-0,0168$  mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une diminution des concentrations en N-NO<sub>3</sub> de  $0,53$  mg l<sup>-1</sup> et  $0,54$  mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.



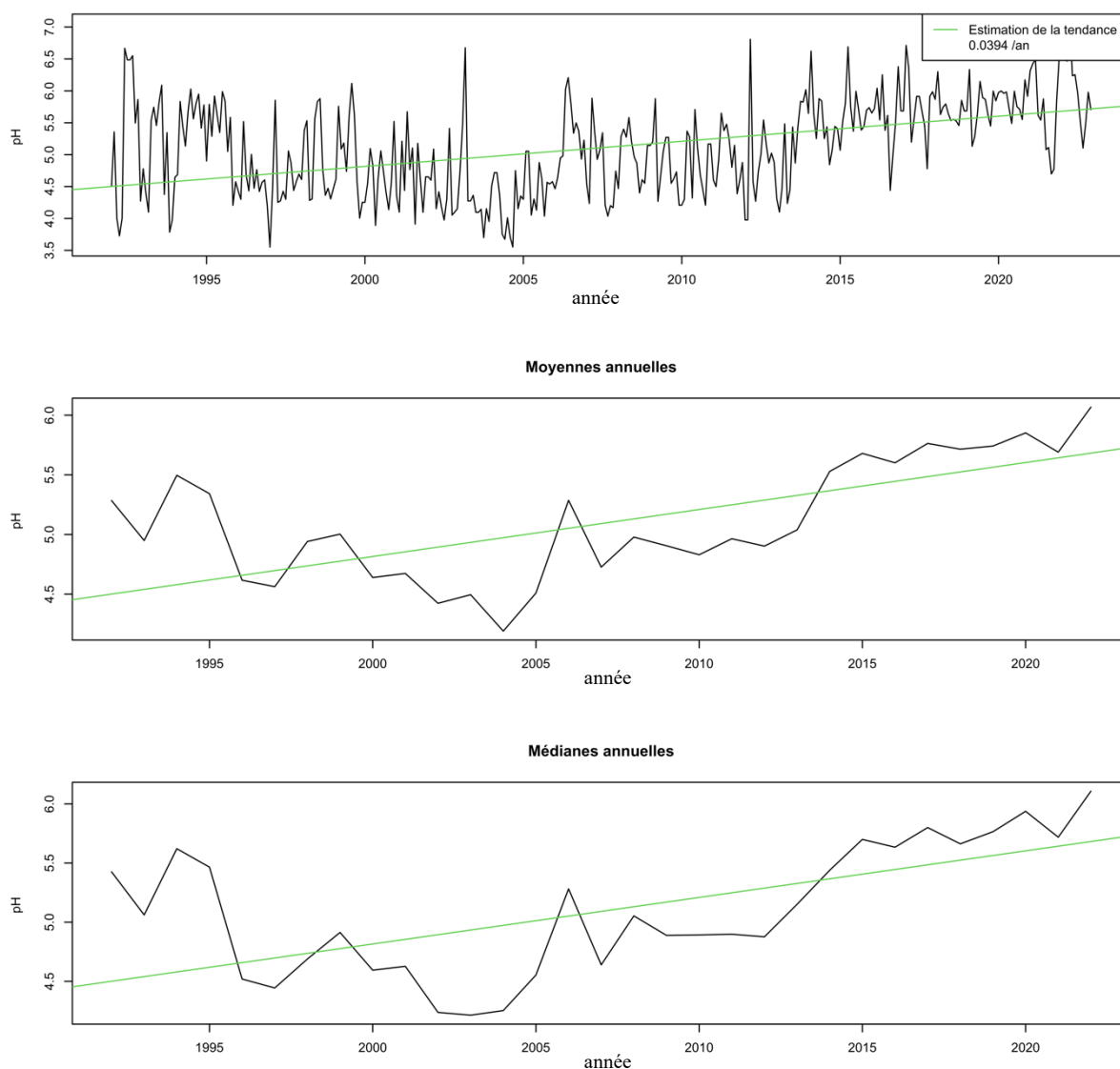
**Moyennes annuelles**



**Médianes annuelles**



**Figure 12 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les pluies à découvert pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**



**Figure 13 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les pluies à découverts pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Le pH pondéré par le volume dans les pluies à découverts (entrées) dans les deux bassins versants (fig. 12 et 13) est en augmentation constante et significative. Les tendances calculées sont respectivement de +0,0389 et +0,0394 mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une augmentation du pH de 1,24 et 1,26 sur 32 ans.



- Dans les pluviollessivats sous épicéas

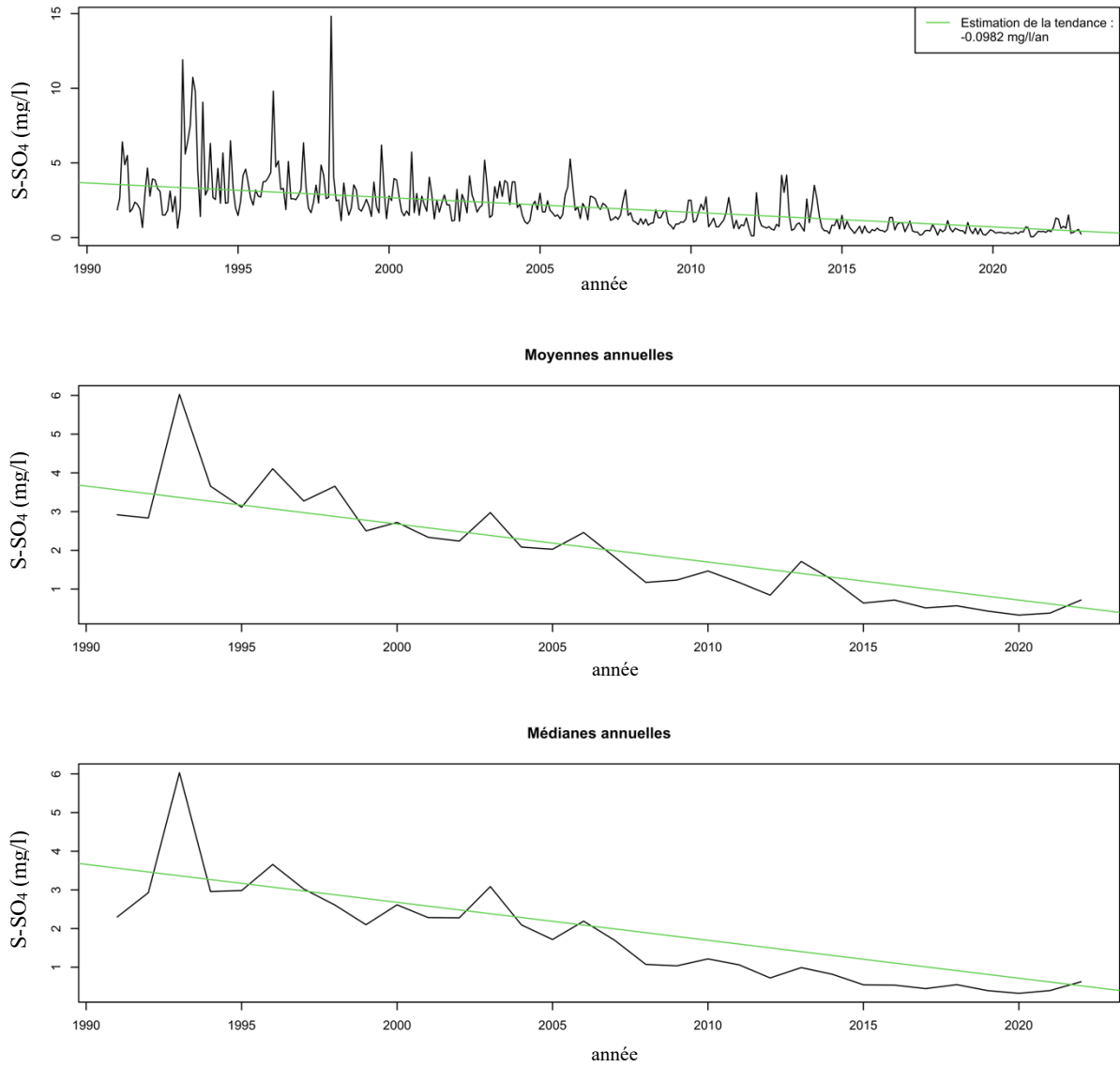
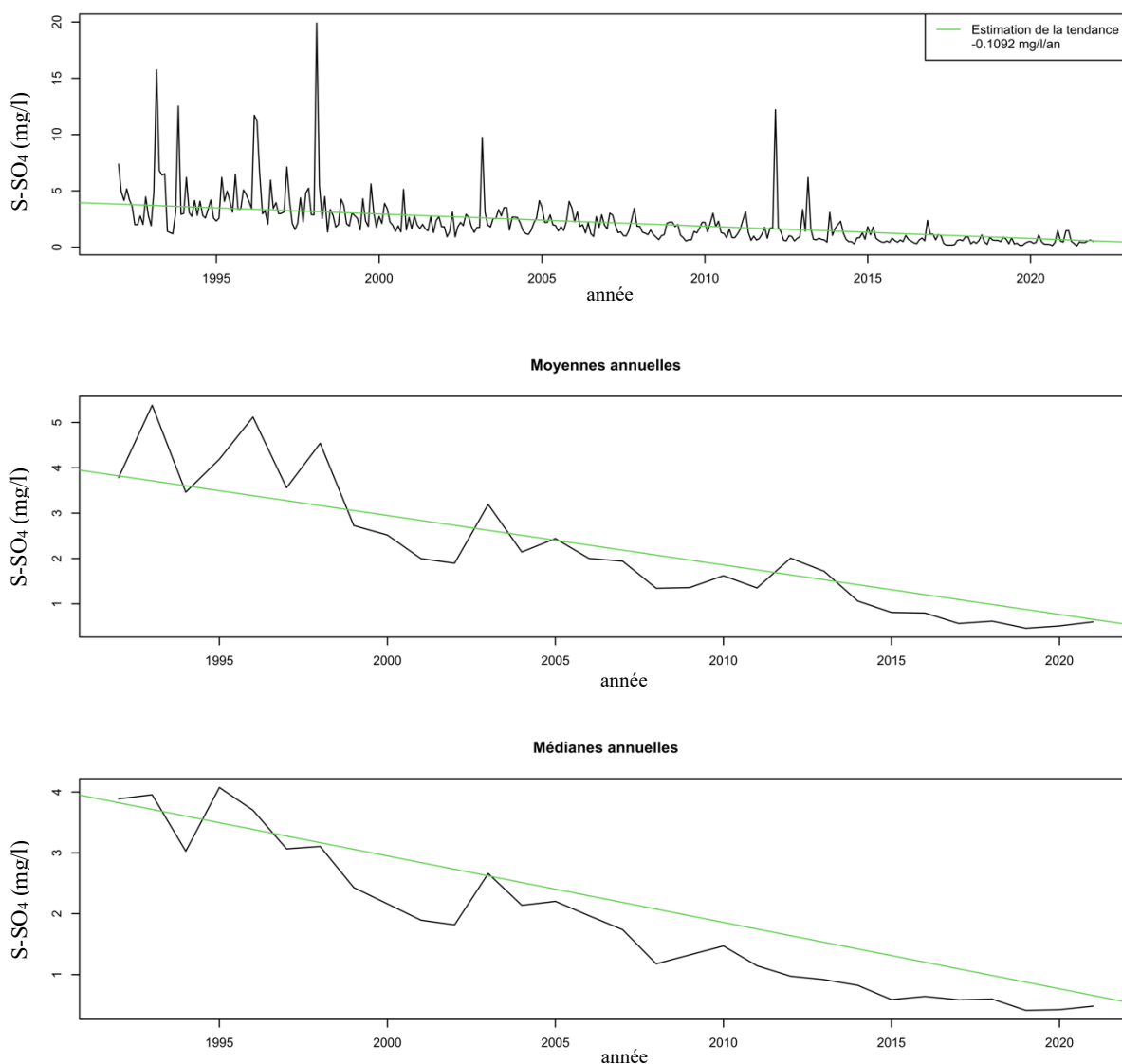
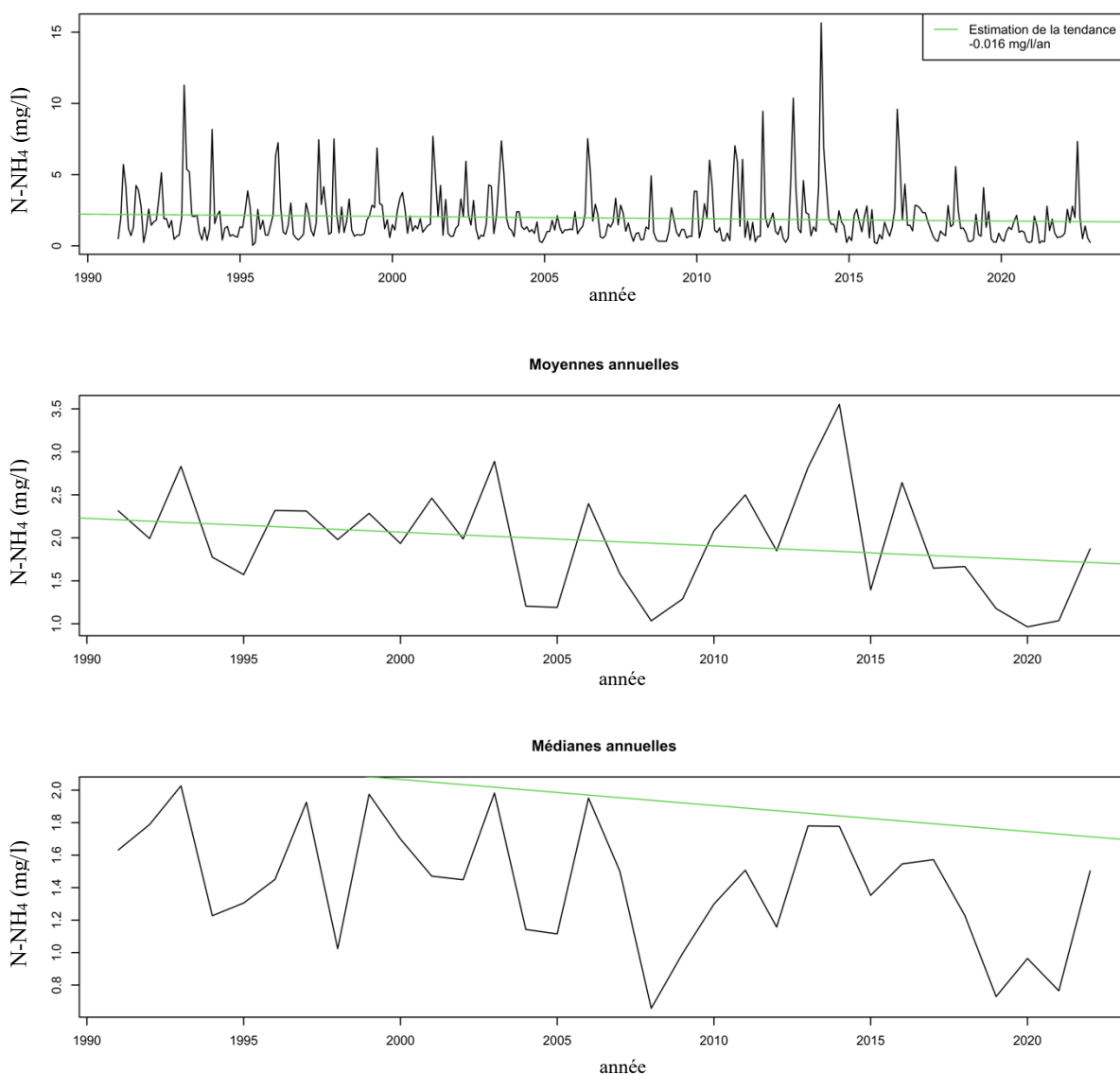


Figure 14 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluviollessivats sous épicéa pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).

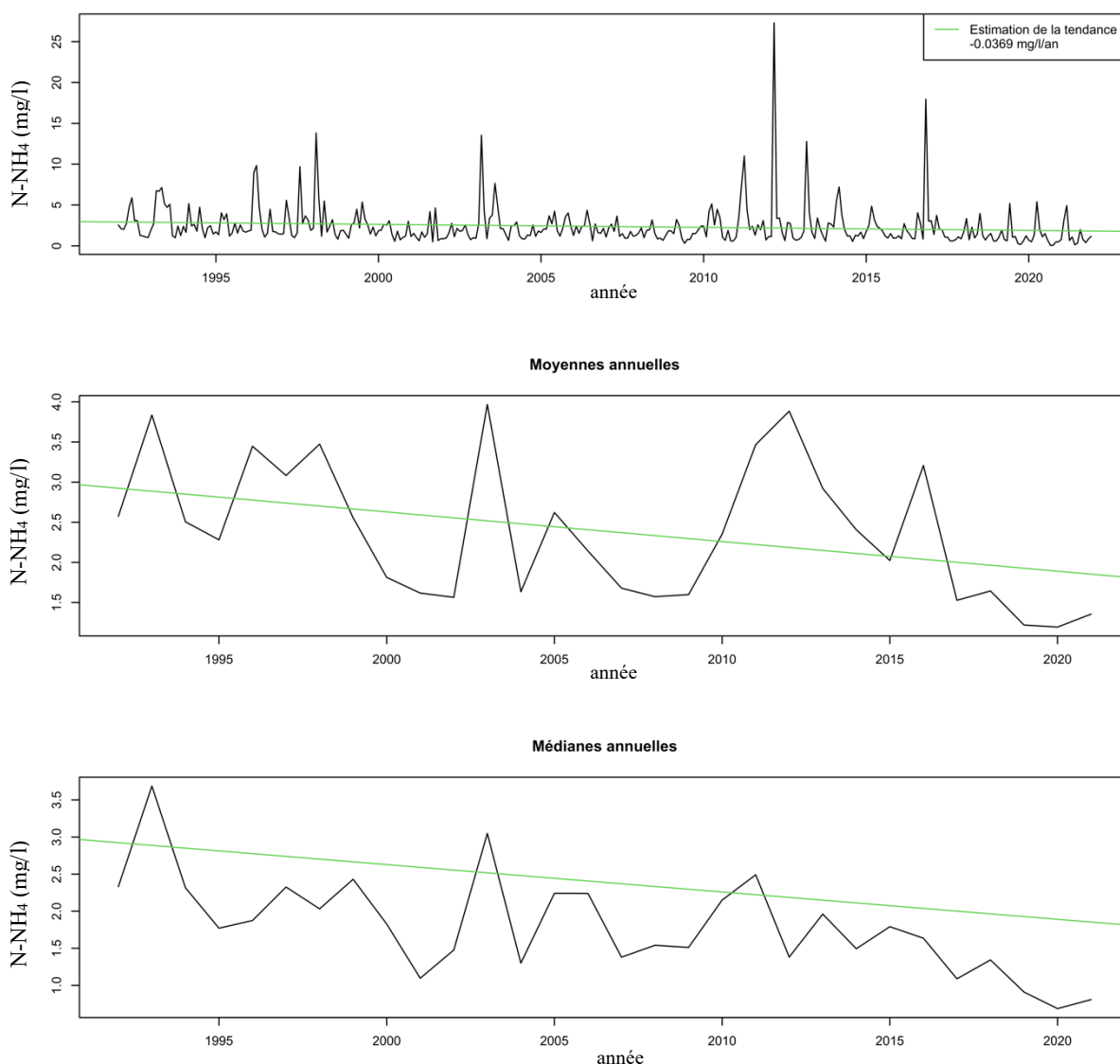


**Figure 15 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéa pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Les concentrations en sulfates pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéas de plus de 60 ans diminuent significativement dans les deux bassins versants (fig. 14 et 15). Les tendances calculées sont respectivement de  $-0,0982$  et  $-0,1092$  mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une diminution des concentrations en S-SO<sub>4</sub> de  $3,14$  mg l<sup>-1</sup> et  $3,49$  mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.

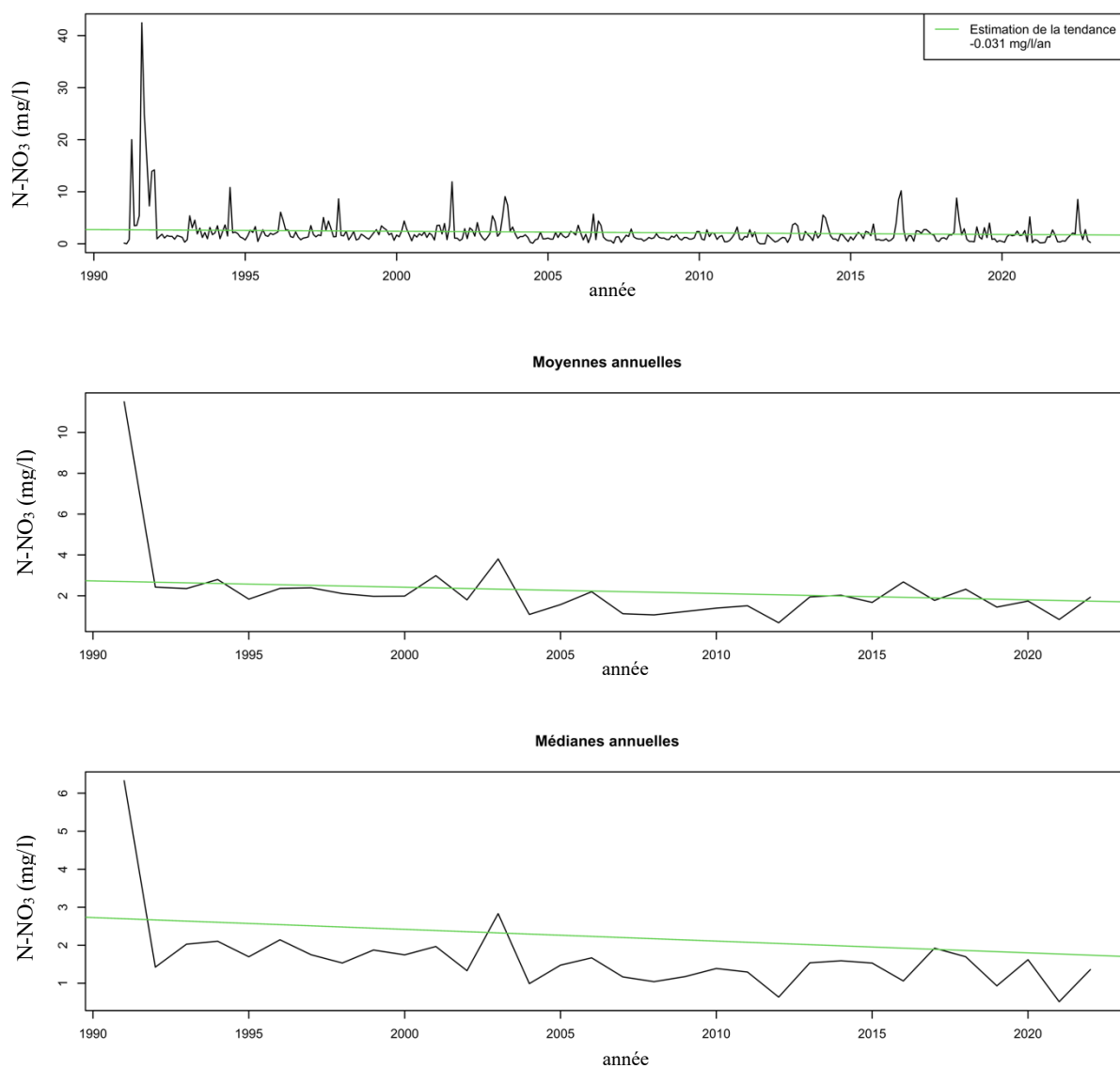


**Figure 16 : moyennes des concentrations en  $N-NH_4$  (mg/l) pondérées par le volume dans les pluiolessivats sous épicéa pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

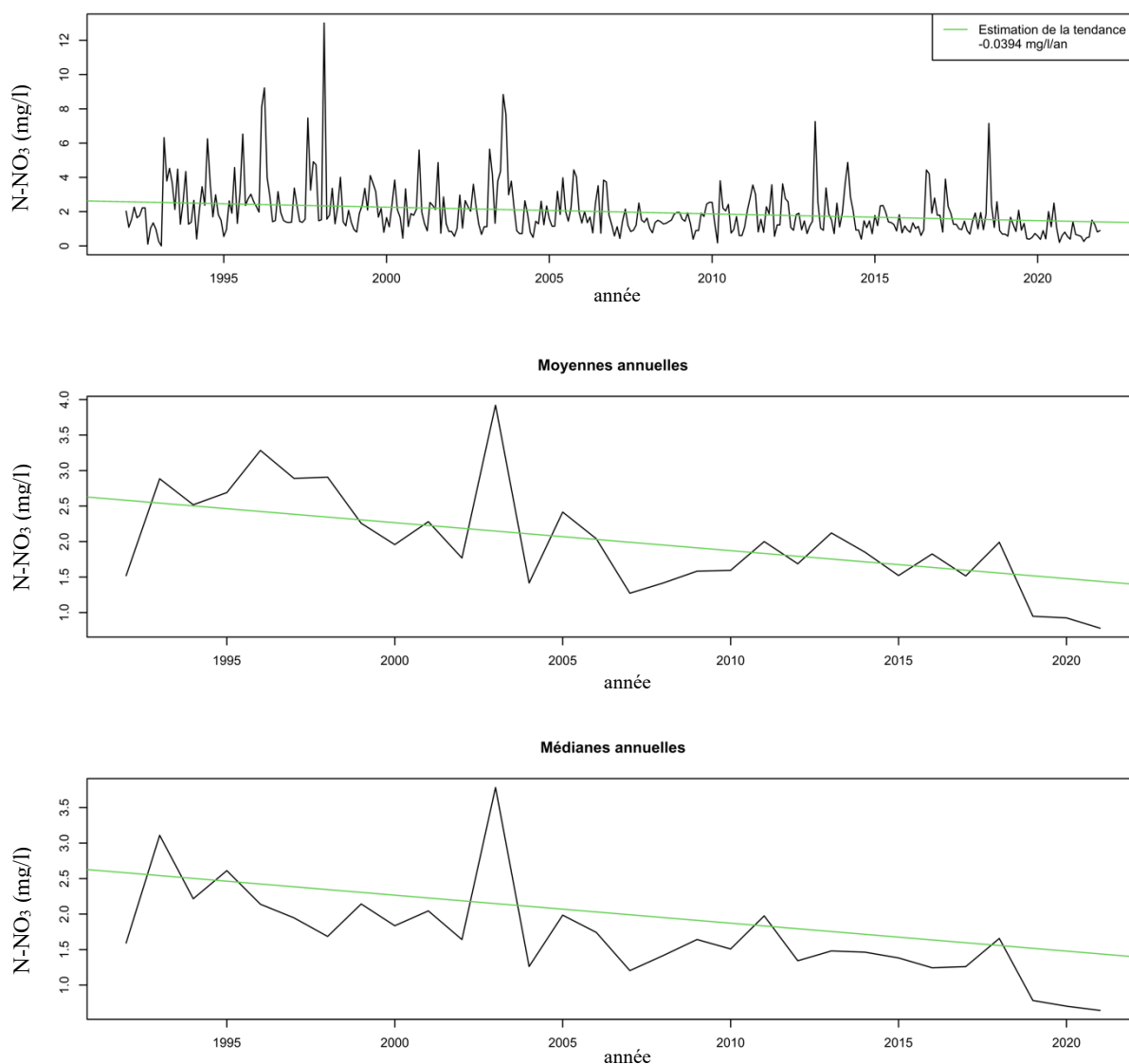


**Figure 17 : moyennes des concentrations en N-NH<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéa pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Les concentrations en ammonium pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéas de plus de 60 ans diminuent significativement dans les deux bassins versants (fig. 16 et 17). Les tendances calculées sont respectivement de -0,016 et -0,0369 mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une diminution des concentrations en N-NH<sub>4</sub> de 0,51 mg l<sup>-1</sup> et 1,18 mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.

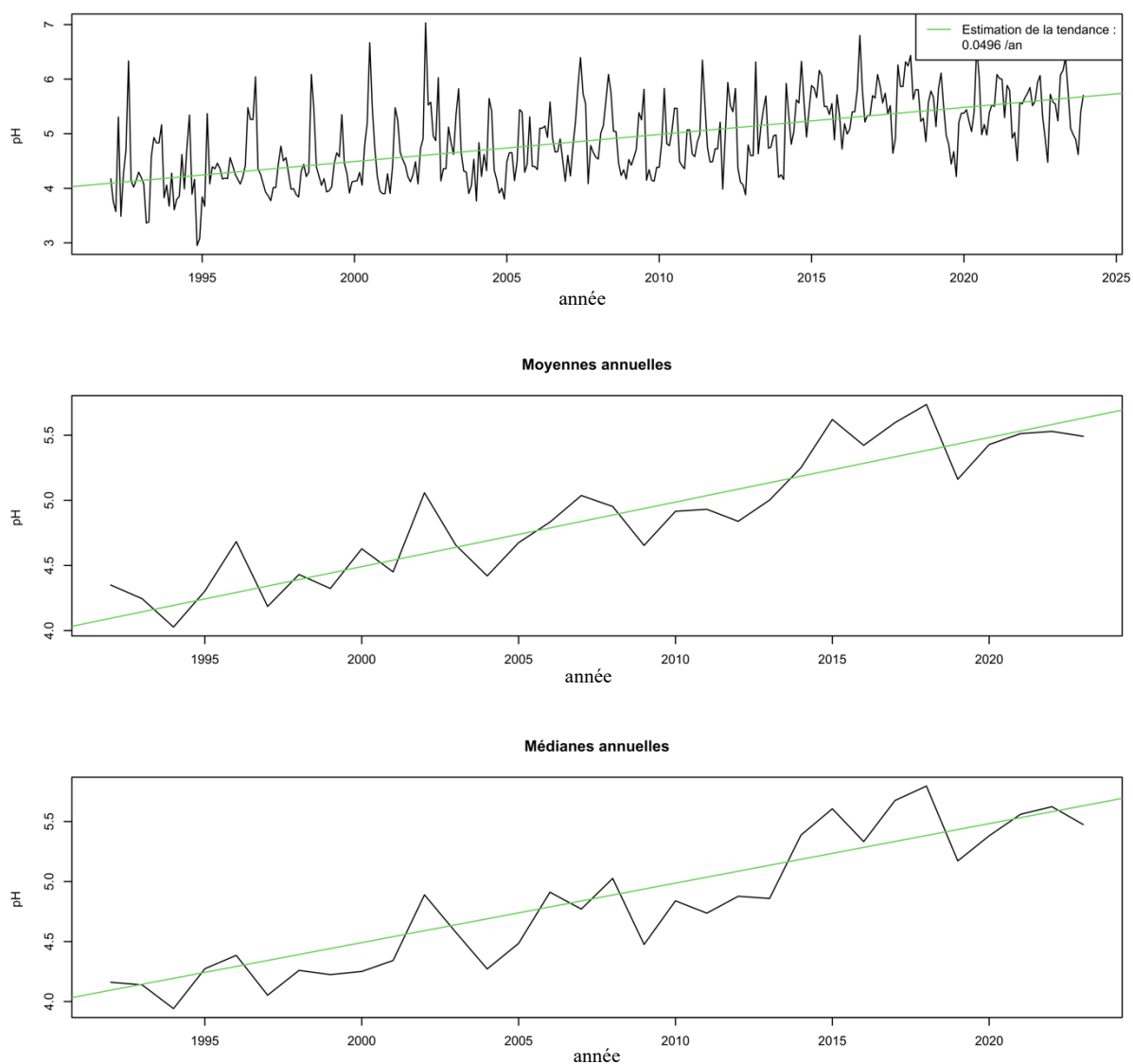


**Figure 18 : moyennes des concentrations en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéa pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

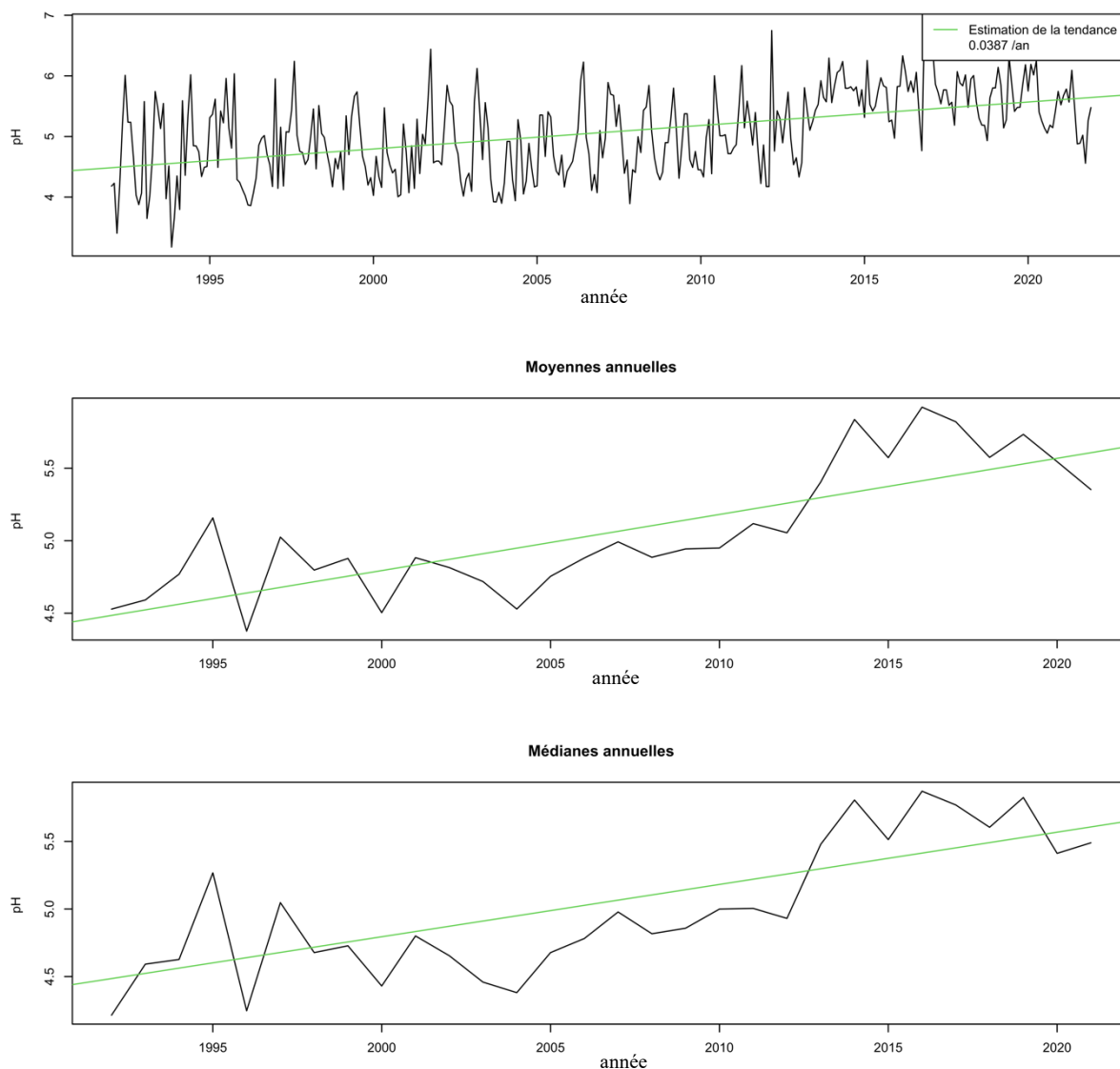


**Figure 19 : moyennes des concentrations en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéa pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Les concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéas de plus de 60 ans diminuent significativement dans les deux bassins versants (fig. 18 et 19). Les tendances calculées sont respectivement de  $-0,031$  et  $-0,0394$  mg l<sup>-1</sup> par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une diminution des concentrations en N-NO<sub>3</sub> de  $0,99$  mg l<sup>-1</sup> et  $1,26$  mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans.



**Figure 20 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les pluviessivats sous épicéa pour le bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**



**Figure 21 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les pluviollessivats sous épicéa pour le bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Les pH pondérés par le volume dans les pluviollessivats sous épicéas de plus de 60 ans dans les deux bassins versants (fig. 20 et 21) sont en augmentation constante et significative. Les tendances calculées sont respectivement de  $+0,0496$  et  $+0,0387 \text{ mg l}^{-1}$  par année pour les bassins versants de La Robinette et de Waroneu. Cela correspond à une augmentation des pH de 1,59 et 1,24 sur 32 ans.

En conclusion, les entrées en dépôts acidifiants et eutrophisants sont en diminution continue et significative dans les deux bassins versants ou cours des 32 ans de la série étudiée (1991 à fin 2022). Ainsi, les concentrations pondérées par le volume en sulfates ont diminué de 76 % en moyenne dans les pluies, et de 82 % dans les pluviollessivats. Les dépôts en ammonium et en nitrates dans les pluies ont, respectivement, diminué de 52 et 60 %. Dans les



pluviolessivats, les dépôts en ammonium et en nitrates ont diminué respectivement de 31 % et 42 %. Sur la même période, le pH dans les pluies a augmenté d'une moyenne de 4,4 en 1991 à 5,7 en 2022.

- Dans les eaux aux exutoires

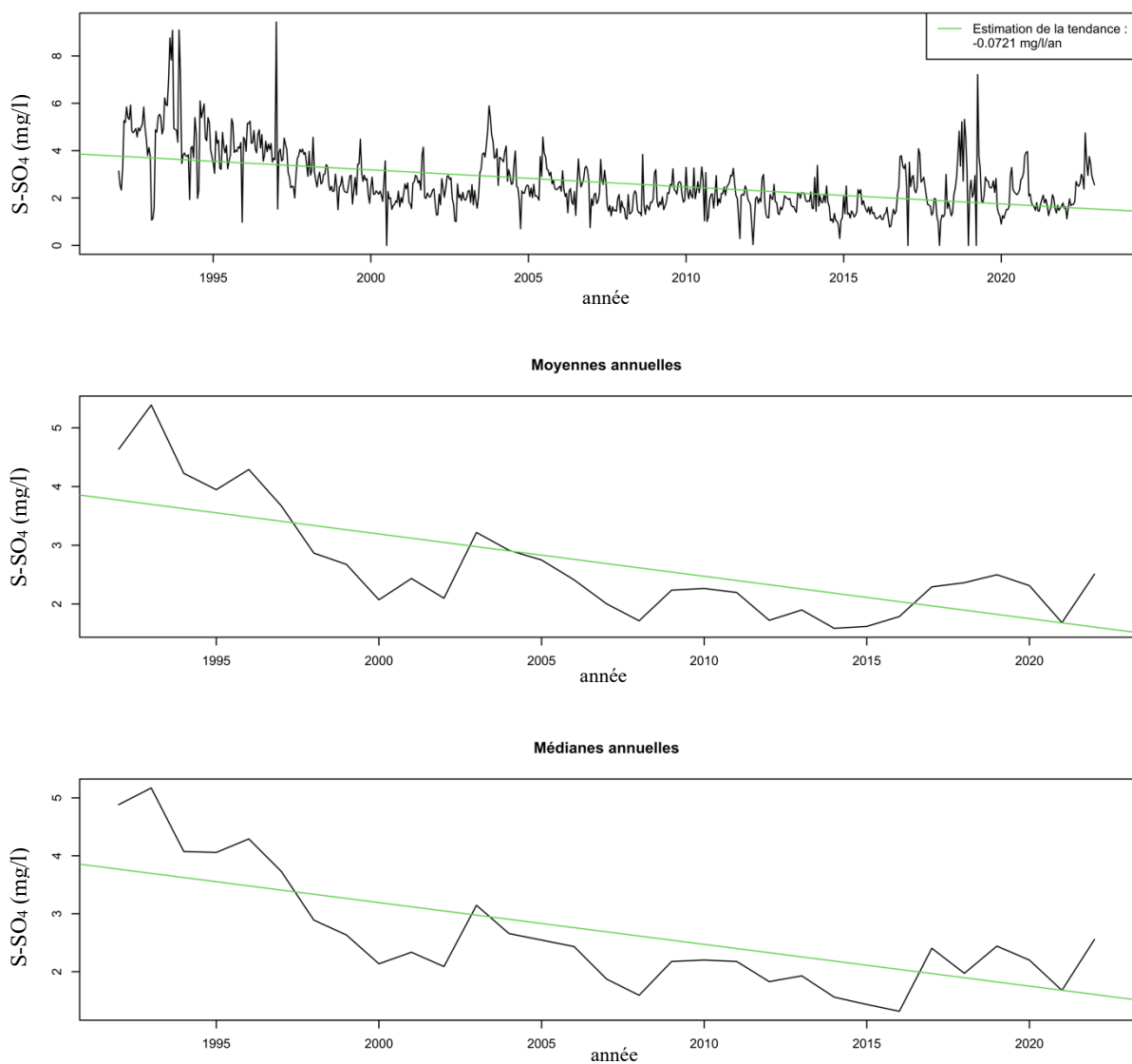
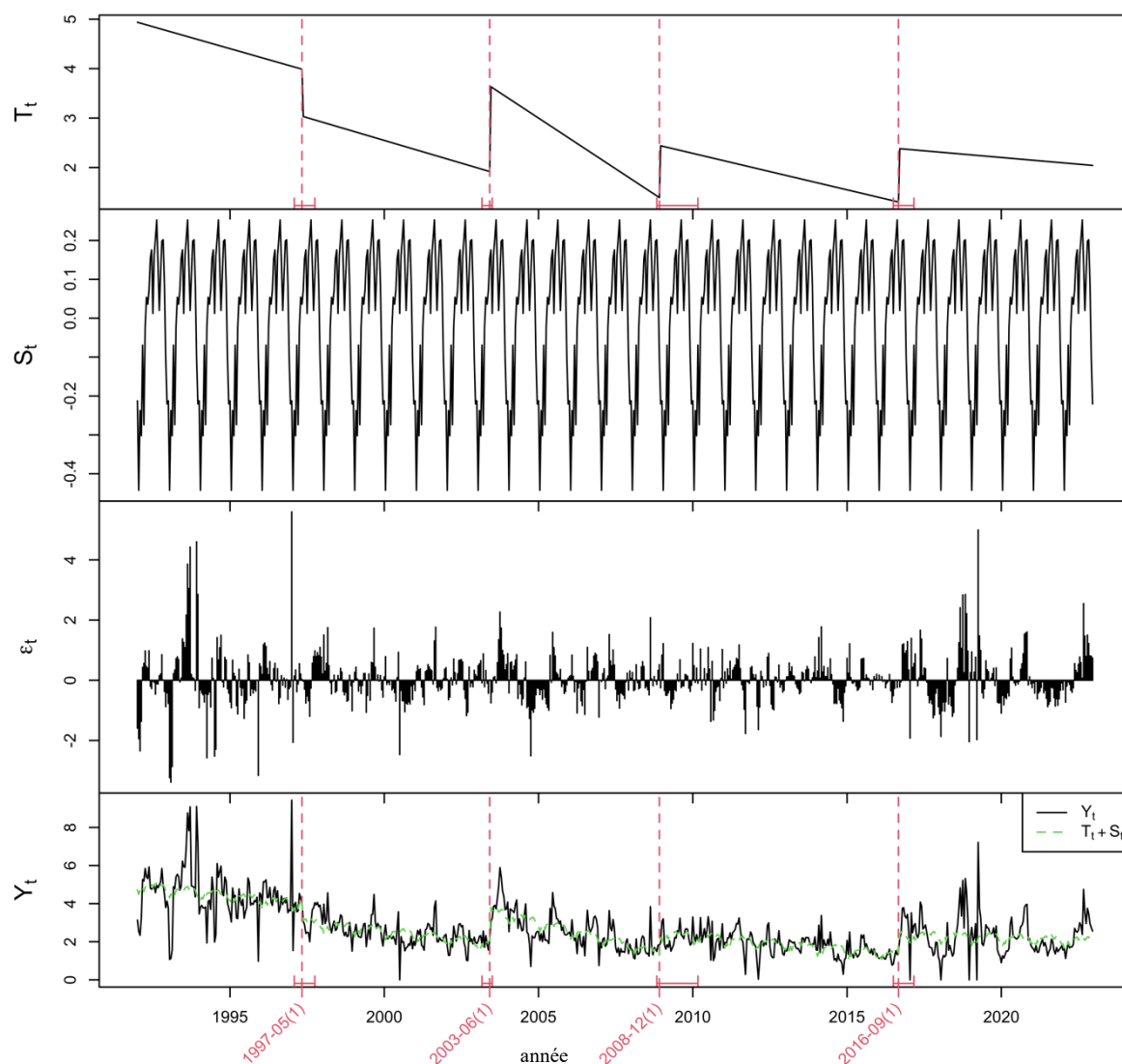


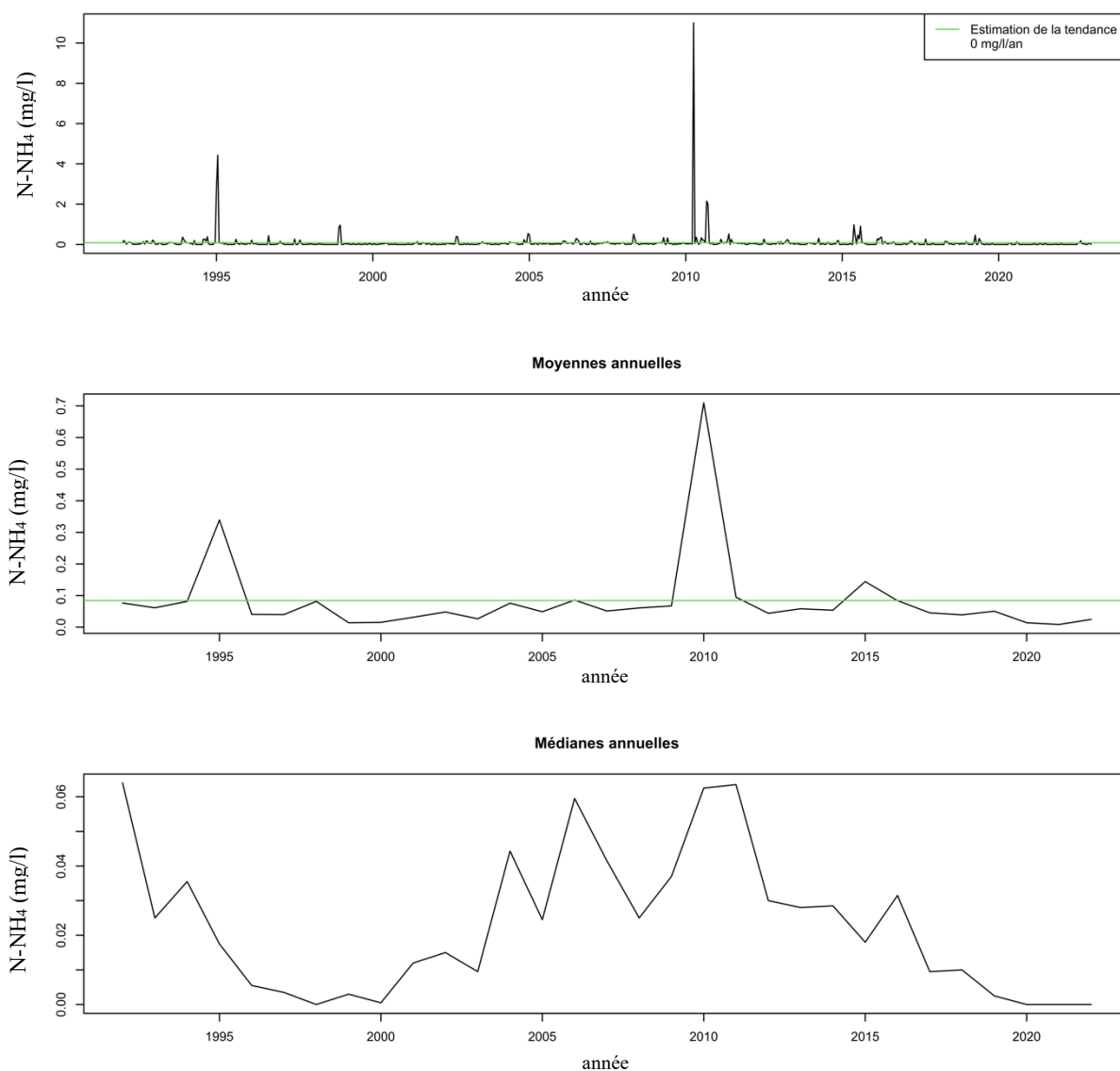
Figure 22 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).

## S-SO<sub>4</sub> décomposition BFAST



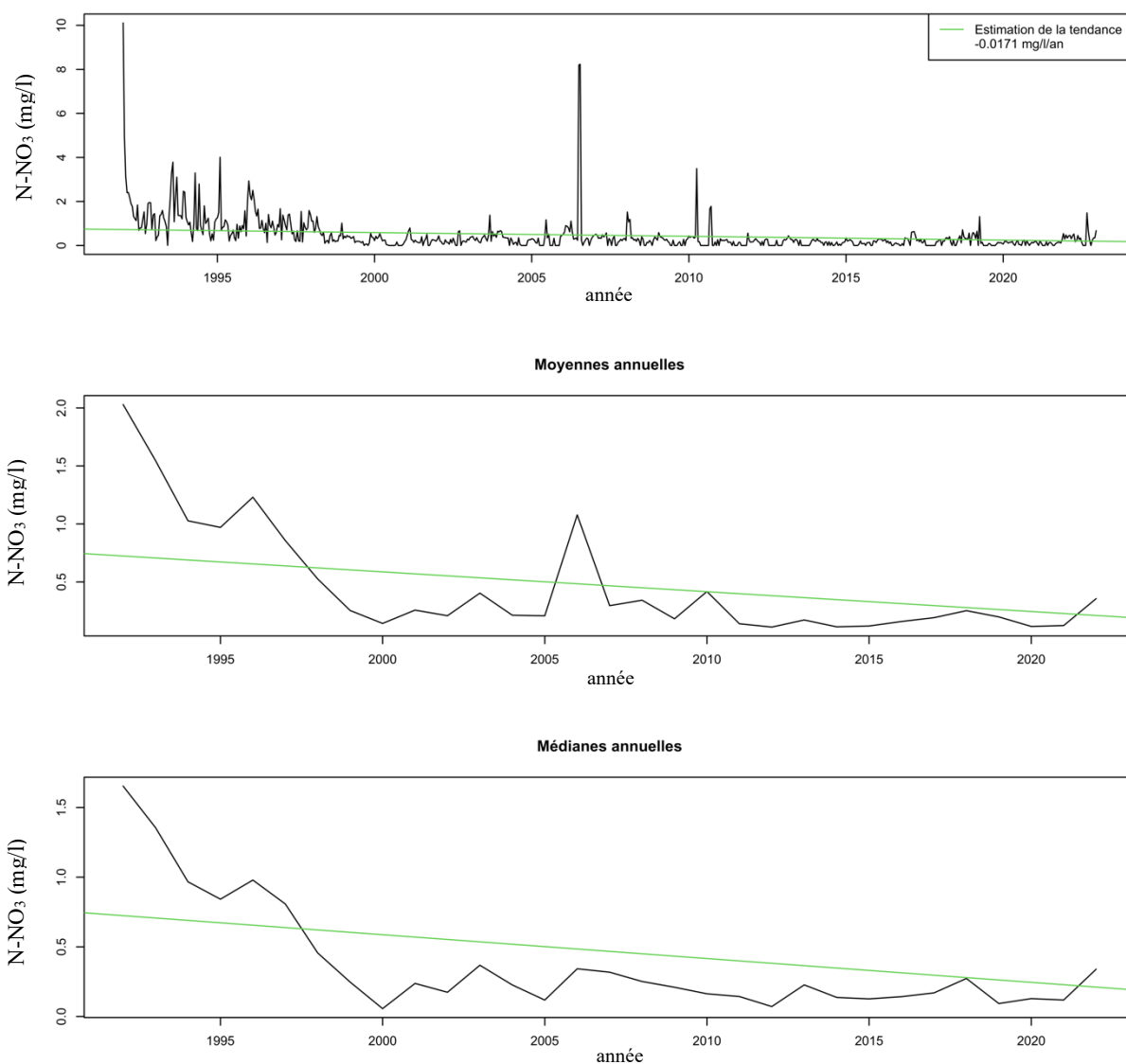
**Figure 23 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.**

Les concentrations en sulfates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de La Robinette diminuent significativement (fig. 23) de 0,0721 mg l<sup>-1</sup> par année. Cela correspond à une diminution des concentrations en S-SO<sub>4</sub> de 2,31 mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans. Des sauts significatifs dans la tendance générale sont observés, ils sont toujours suivis de diminutions.



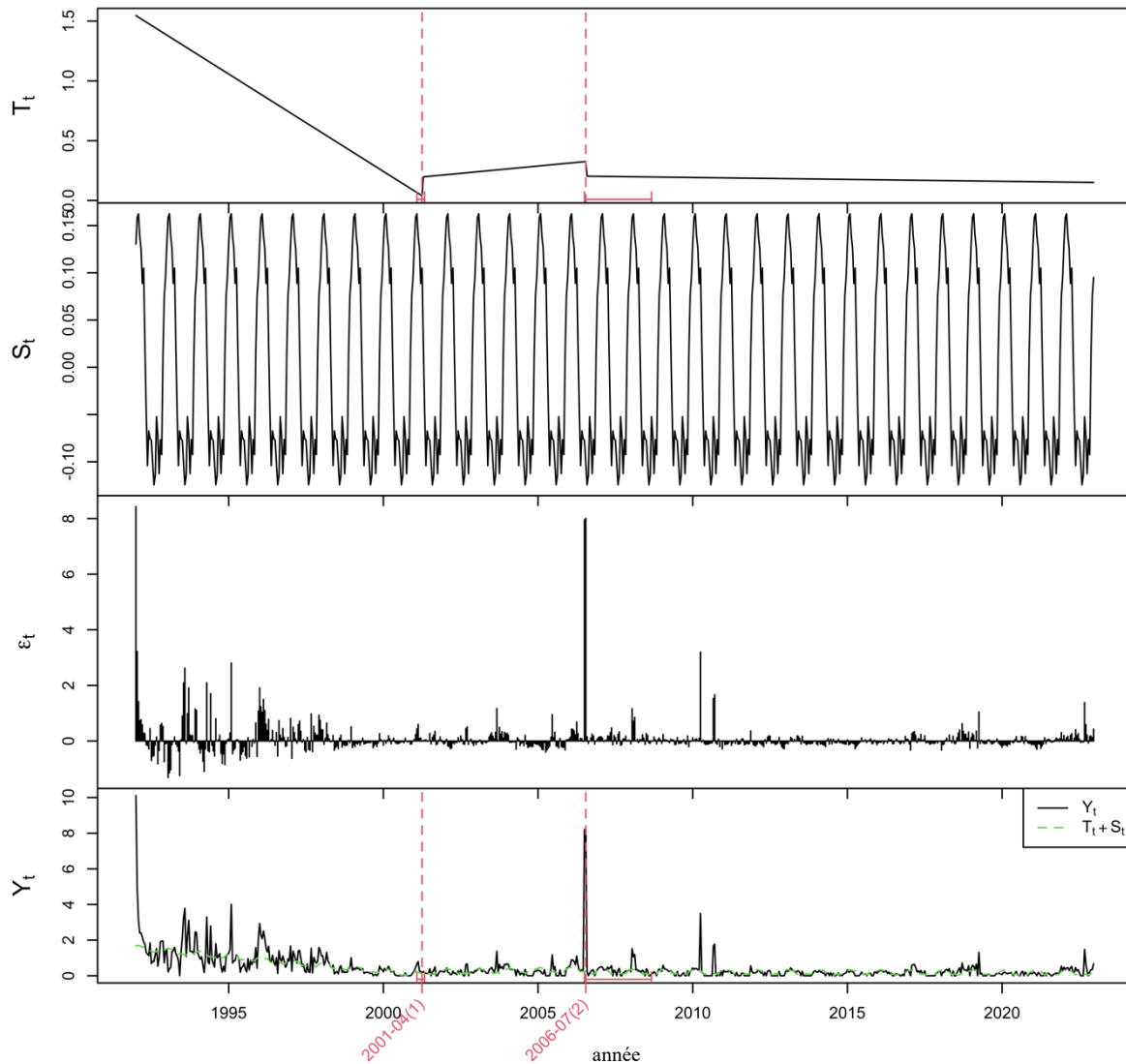
**Figure 24 : moyennes des concentrations en N-NH<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Les concentrations en ammonium pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de La Robinette sont très faibles et ne présentent pas de tendance significative au cours du temps (fig. 24).



**Figure 25 : moyennes des concentrations en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

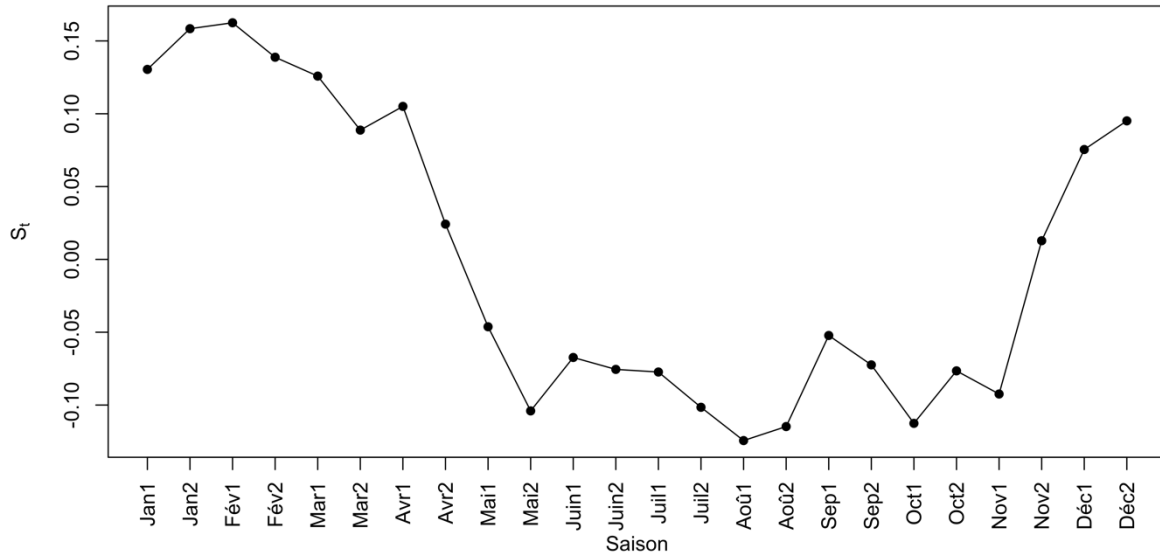
### N-NO<sub>3</sub> décomposition BFAST



**Figure 26 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes des concentrations pondérées par le volume en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.**

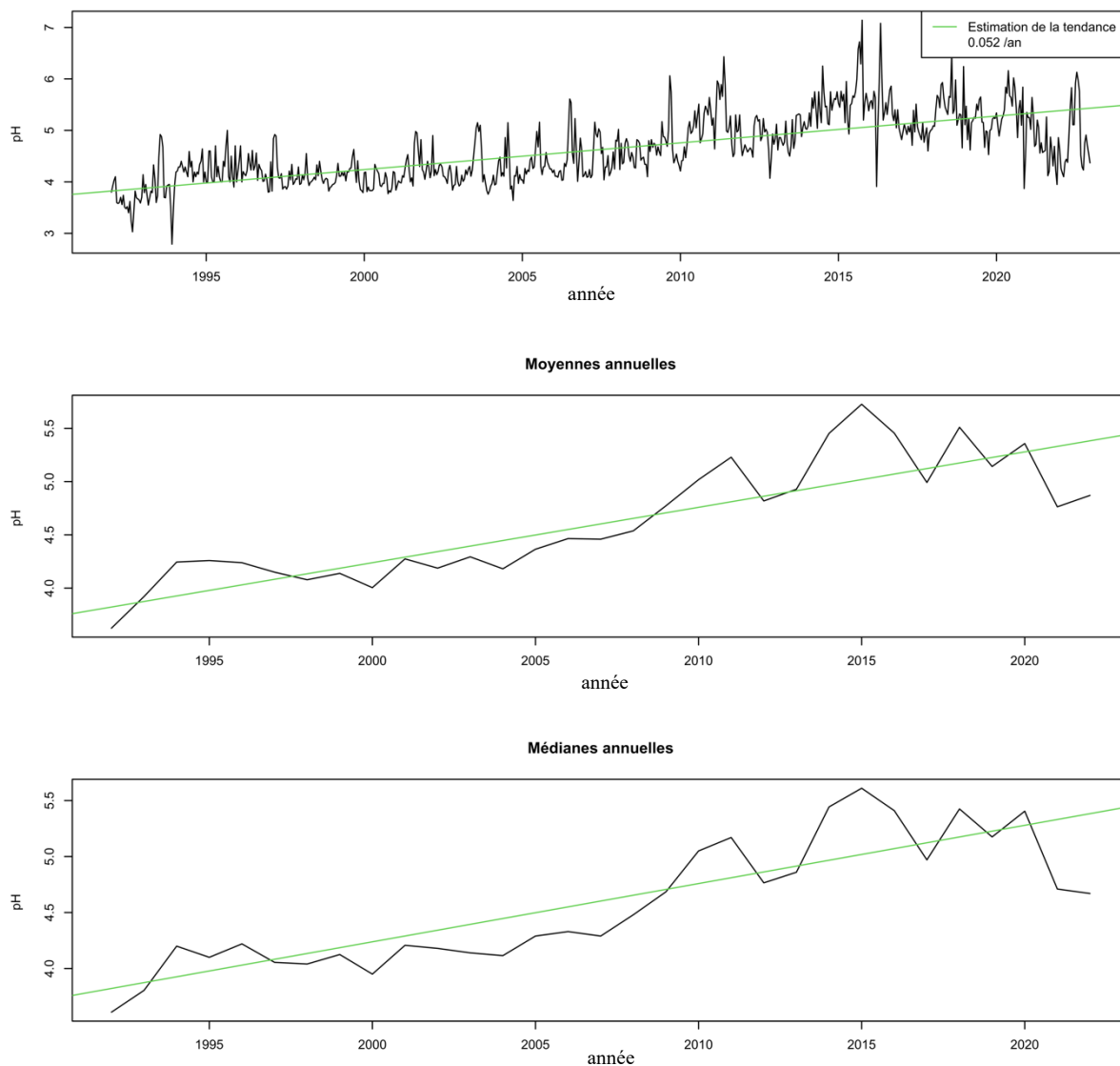
Les concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de La Robinette sont faibles (fig. 25). La tendance calculée est  $-0,0171 \text{ mg l}^{-1}$ , cela correspond à une diminution des concentrations en N-NO<sub>3</sub> de  $0,55 \text{ mg l}^{-1}$  sur 32 ans, soit une diminution de près de 80 % par rapport au concentrations mesurées en 1991. L'analyse BFAST de la série temporelle nous montre que la diminution des concentrations en N-NO<sub>3</sub> s'est opérée entre 1991 et 2001 et que depuis les concentrations sont très faibles et sans tendance.

### N-NO<sub>3</sub> composante saisonnière



**Figure 27 : composante saisonnière de l'ensemble de série temporelle ( $S_t$ ) des moyennes des concentrations pondérées par le volume en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.**

Les concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de La Robinette (fig. 26) suivent une saisonnalité inversée par rapport à la phénologie de la végétation, ce qui pourrait illustrer une compétition pour l'azote entre les micro-organismes et les végétaux.



**Figure 28 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**



## pH - Décomposition BFAST

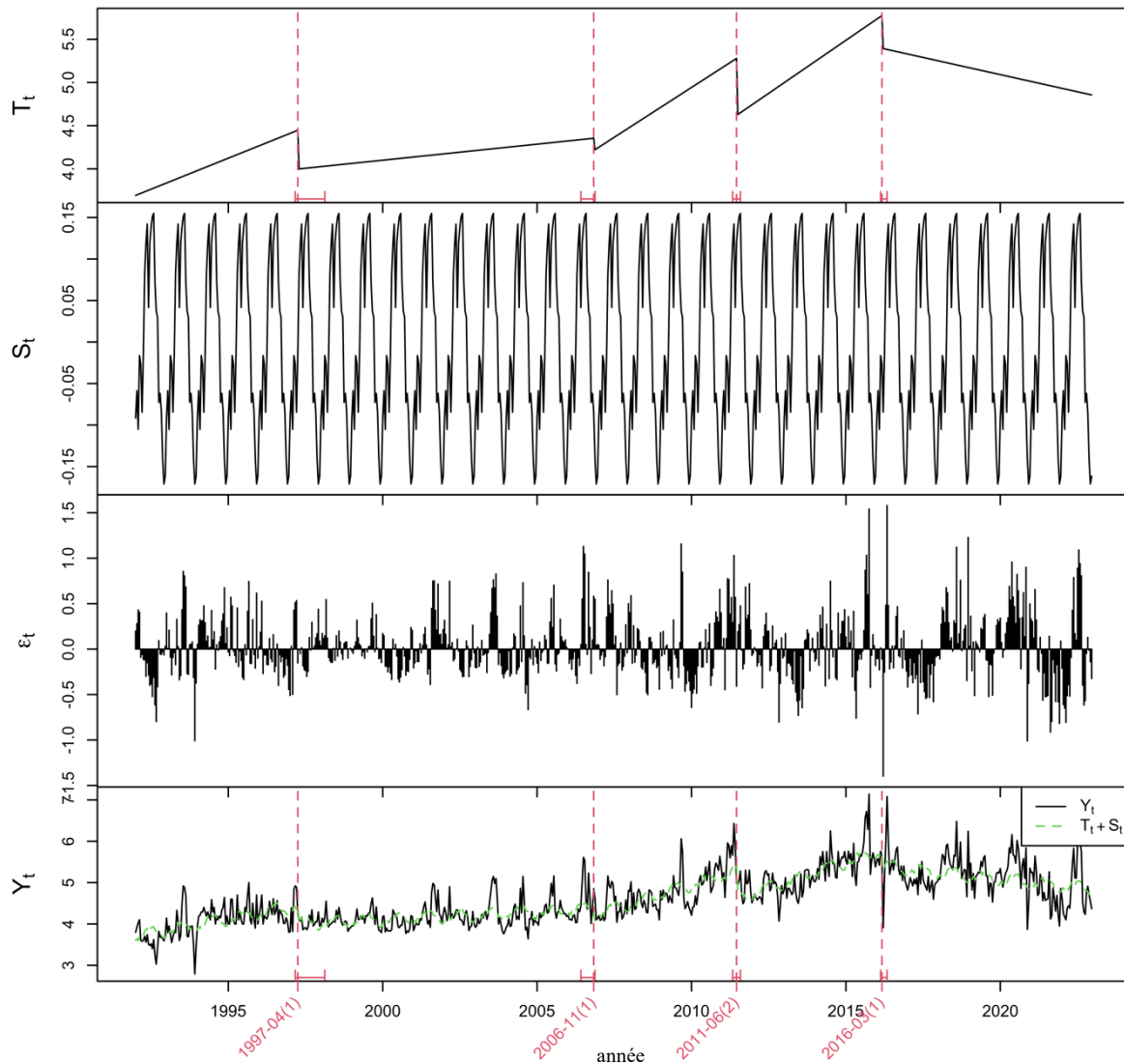
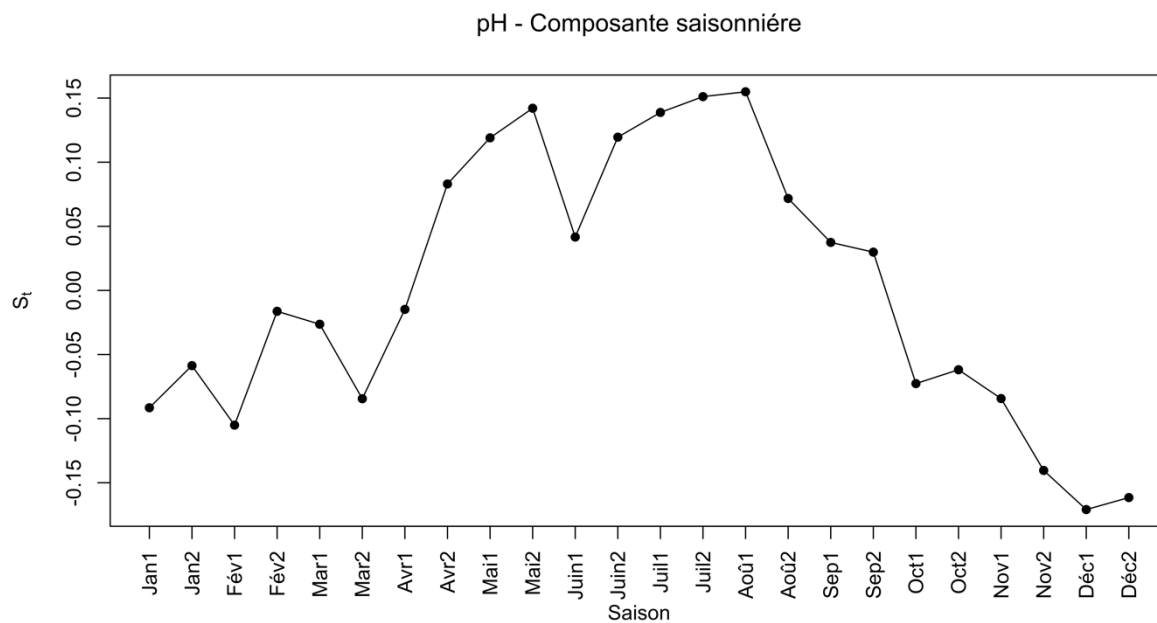


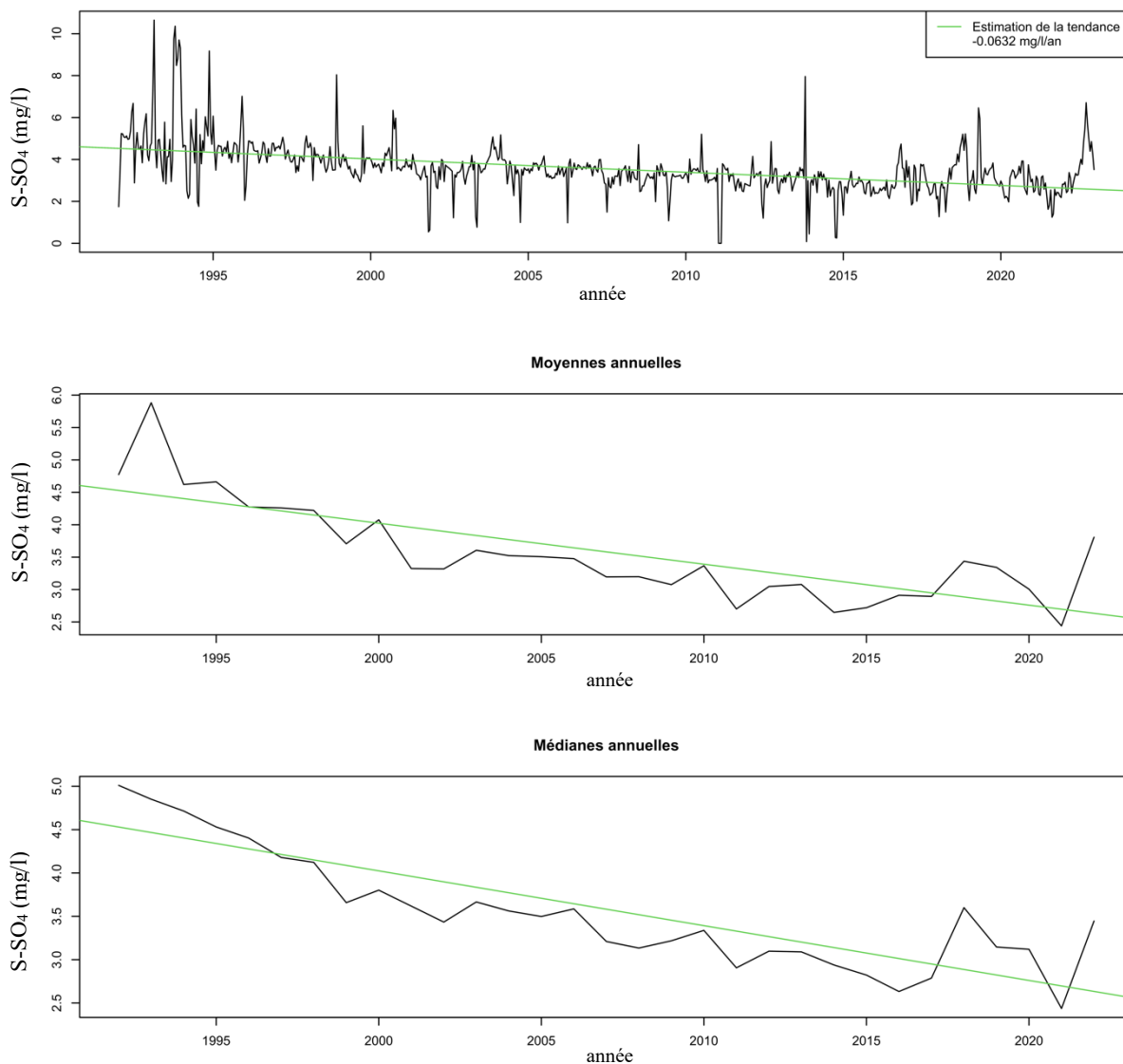
Figure 29 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes des pH pondérés par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.

Le pH pondéré par le volume dans les eaux à l'exutoire de La Robinette est en augmentation depuis 1991 (fig. 28). La tendance calculée est de  $+0,052$ , ce qui correspond à une augmentation du pH de 1,66 sur 32 ans. Cependant, l'analyse BFAST (fig. 29) de la série temporelle nous montre une augmentation continue du pH entre 1991 et 2016, et une diminution depuis 2016.



**Figure 30 : composante saisonnière de l'ensemble de série temporelle ( $S_t$ ) des moyennes du pH pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.**

Le pH dans les eaux à l'exutoire de La Robinette suit une saisonnalité (fig. 30) opposée à celle des nitrates (fig. 27).



**Figure 31 : moyennes des concentrations en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

## S-SO<sub>4</sub> décomposition BFAST

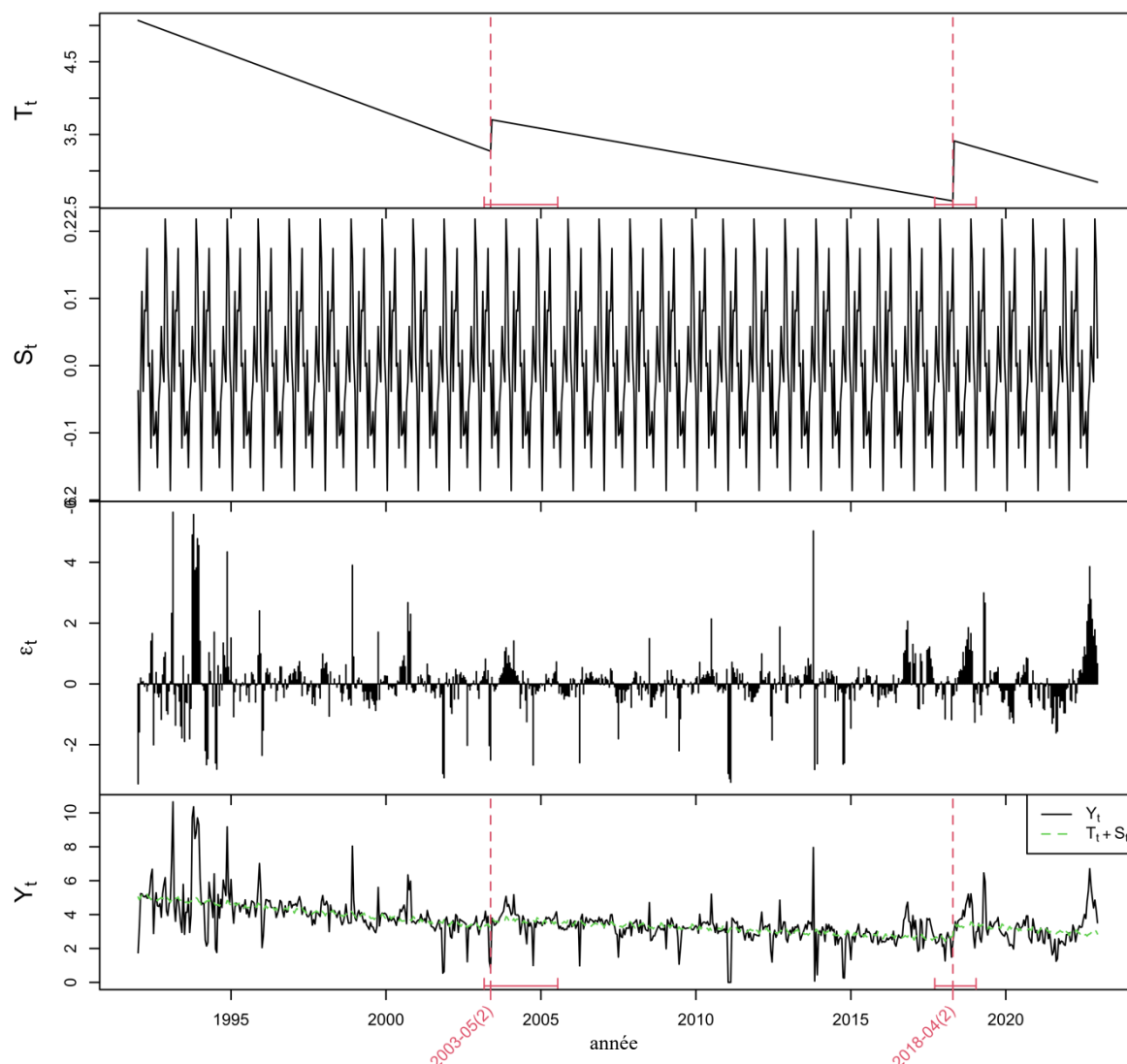
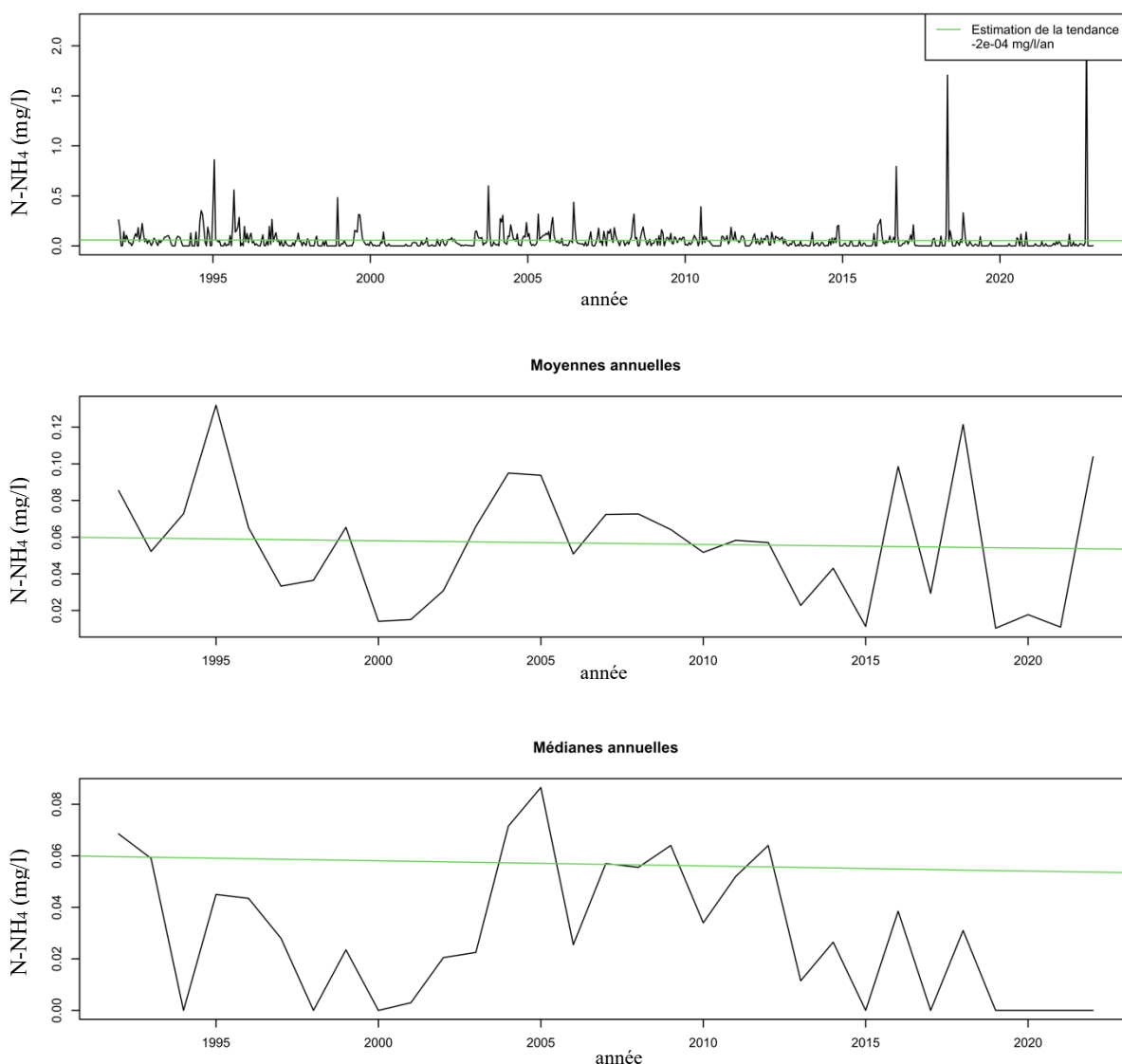


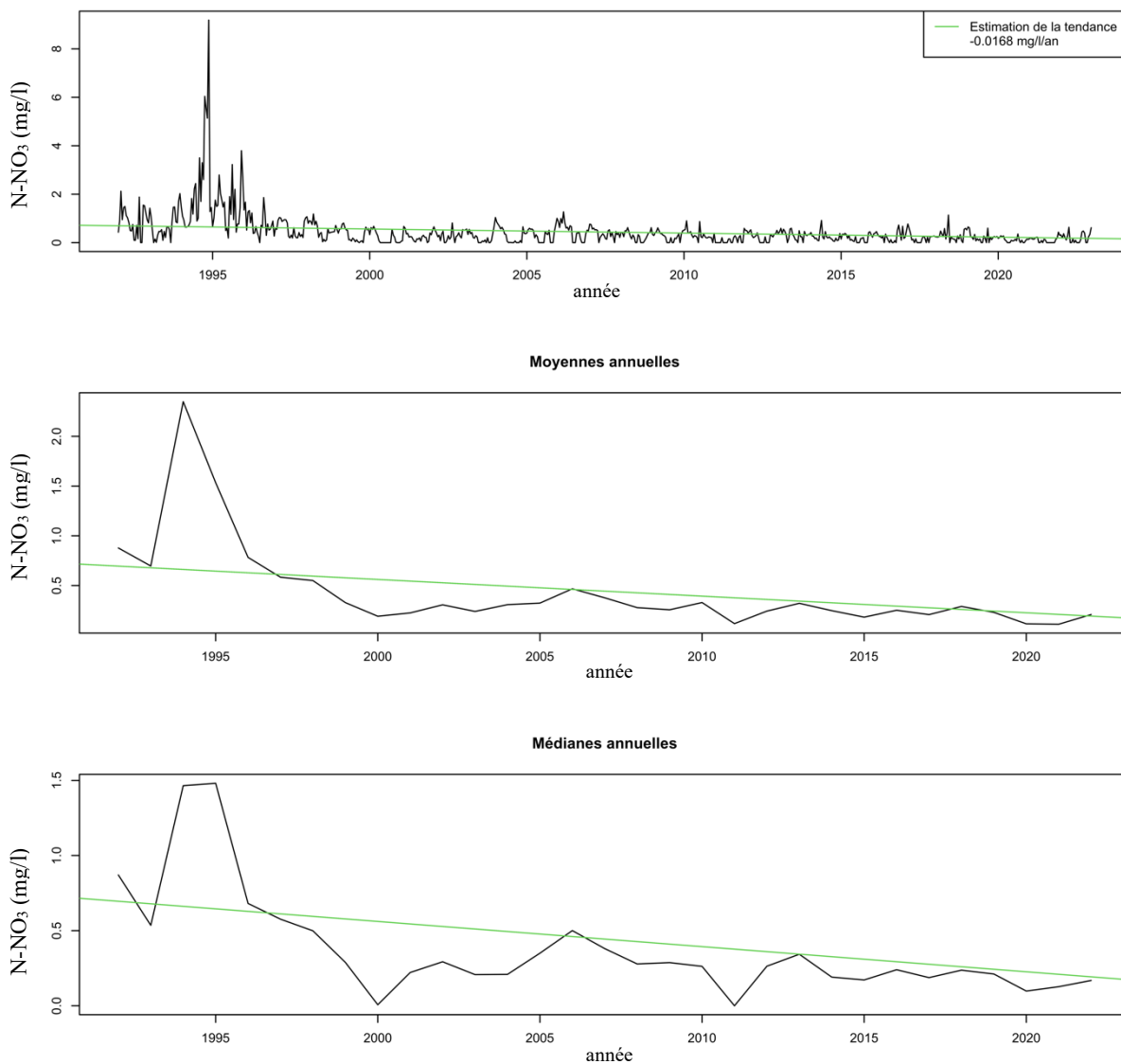
Figure 32 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes des concentrations pondérées par le volume en S-SO<sub>4</sub> (mg/l) dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022.

Les concentrations en sulfates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de Waroneu diminuent significativement (fig. 32) de 0,0632 mg l<sup>-1</sup> par année. Cela correspond à une diminution des concentrations en S-SO<sub>4</sub> de 2,02 mg l<sup>-1</sup> sur 32 ans. Des sauts dans la tendance générale sont statistiquement observés et toujours suivis de diminutions.



**Figure 33 : moyennes des concentrations en N-NH<sub>4</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

Comme à La Robinette, les concentrations en ammonium pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de Waroneu sont très faibles (fig. 33) et sans tendance mesurée.



**Figure 34 : moyennes des concentrations en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

## N-NO<sub>3</sub> décomposition BFAST

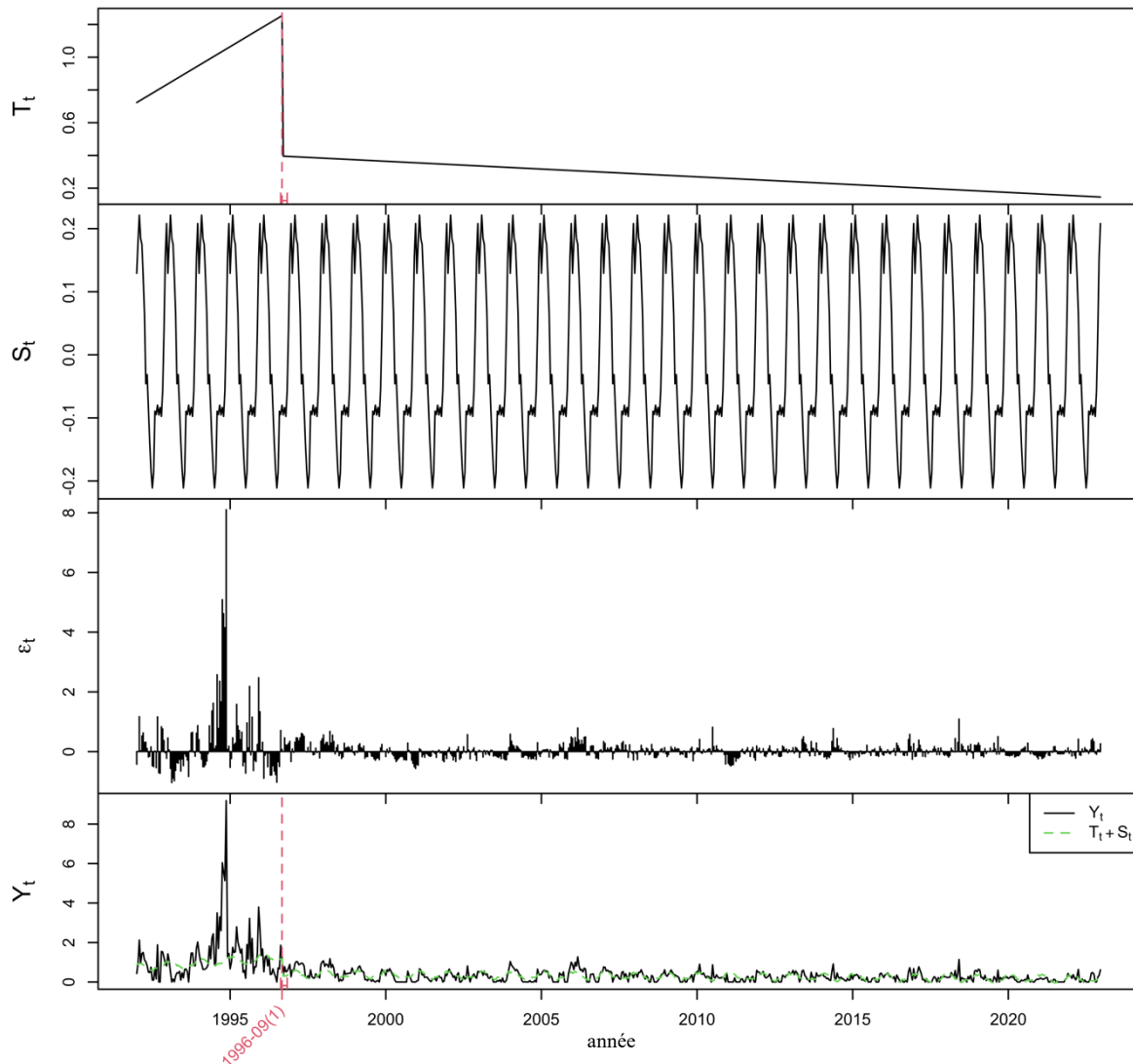
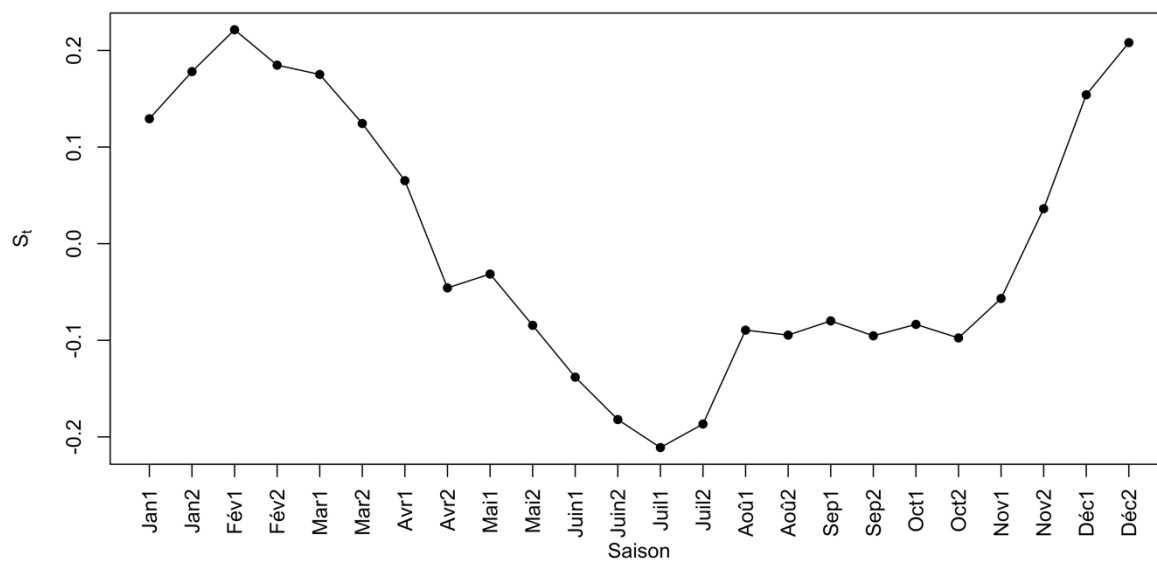


Figure 35 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes des concentrations pondérées par le volume en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de La Robinette entre 1991 et fin 2022.

Les concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de Waroneu sont faibles (fig. 35). La tendance calculée est  $-0,0168 \text{ mg l}^{-1}$ . L'analyse BFAST de la série temporelle nous montre que les concentrations en N-NO<sub>3</sub> ont d'abord augmenté jusqu'en 1996, conséquence possible de l'amendement calcaro- magnésien du bassin versant mais que depuis la tendance est à une diminution continue.

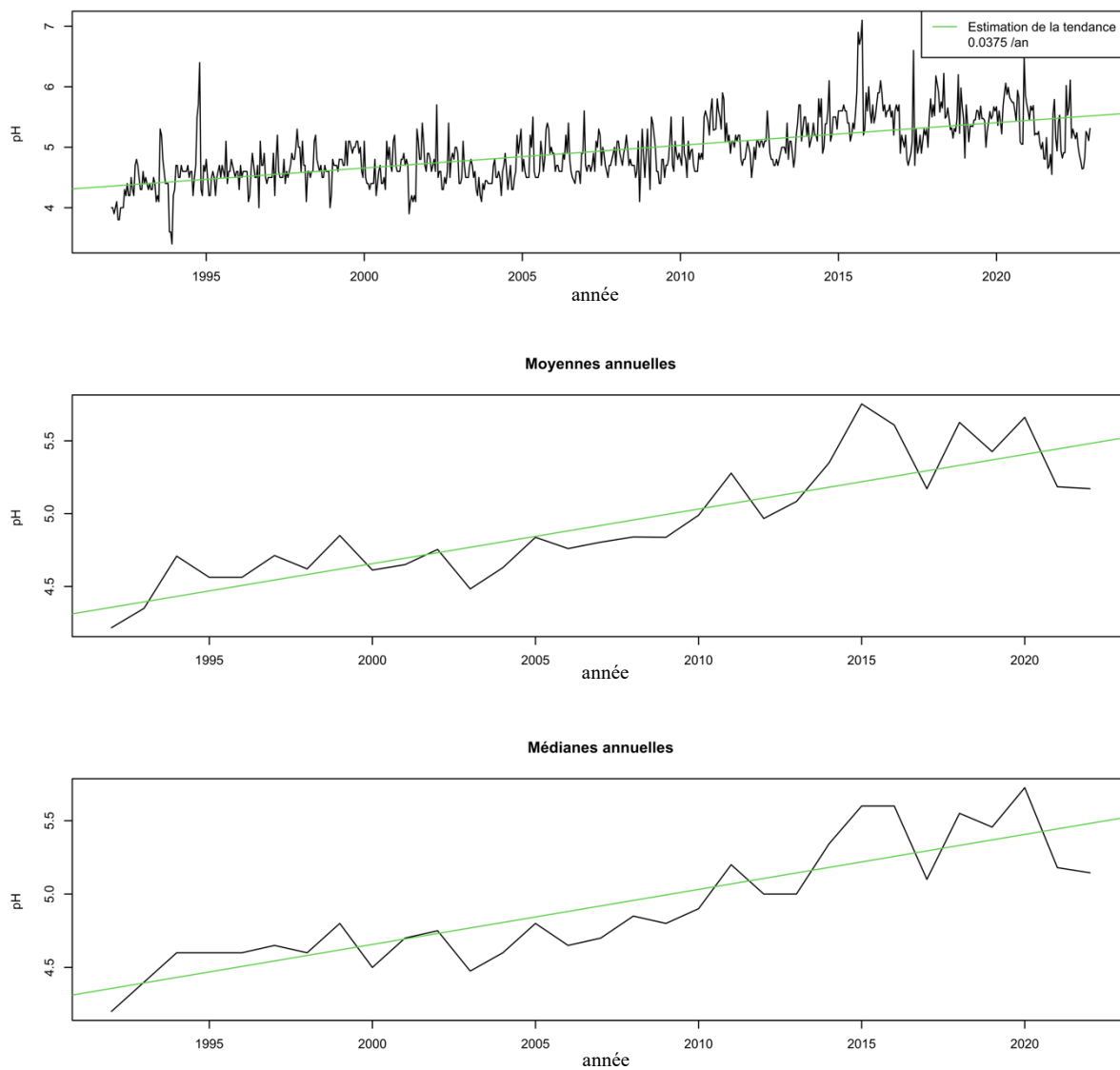
### N-NO<sub>3</sub> composante saisonnière



**Figure 36 : composante saisonnière de l'ensemble de série temporelle ( $S_t$ ) des moyennes des concentrations pondérées par le volume en N-NO<sub>3</sub> (mg/l) dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022.**

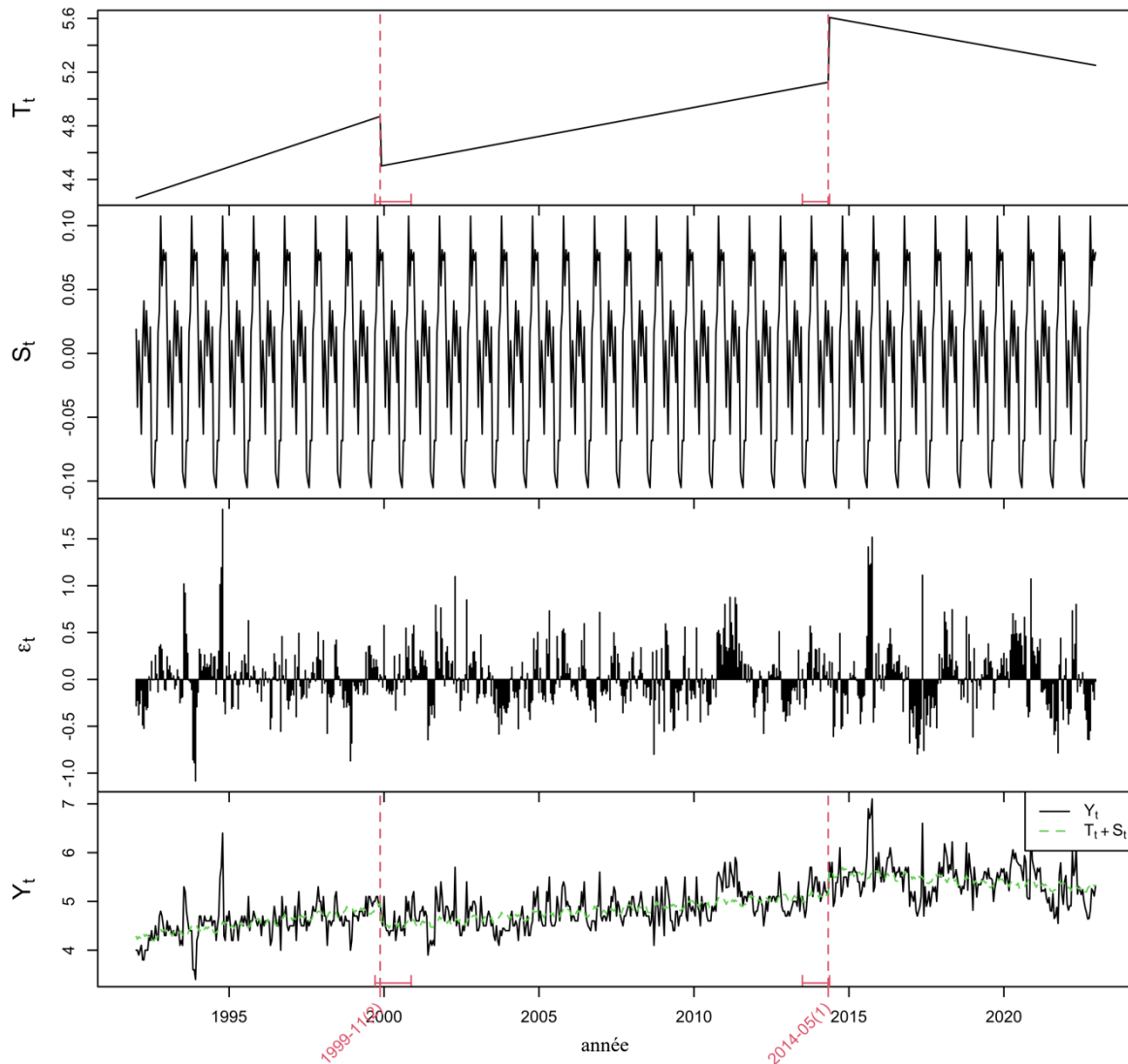
De manière similaire à ce qu'on observe à La Robinette, les concentrations en nitrates pondérées par le volume dans les eaux à l'exutoire de Waroneu (fig. 36) suivent une saisonnalité inverse de celle de la végétation, ce qui pourrait illustrer la compétition pour l'azote entre les micro-organismes et les végétaux.





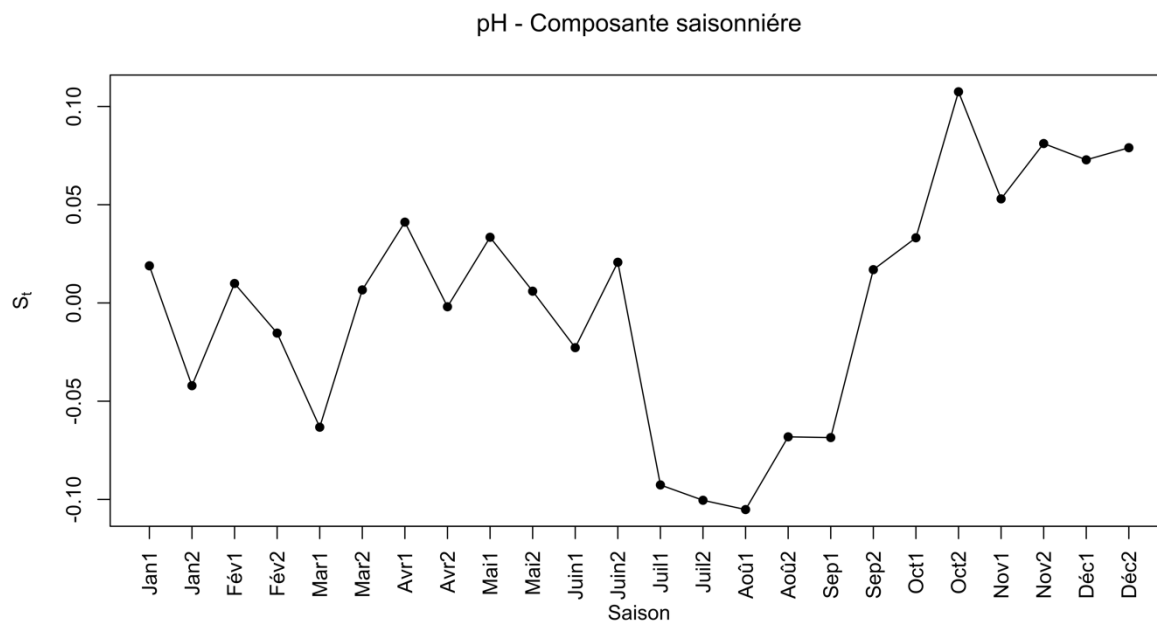
**Figure 37 : moyennes du pH pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022, moyennes mensuelles, moyennes annuelles et médianes annuelles avec estimation de la tendance (en vert).**

### pH - Décomposition BFAST



**Figure 38 : décomposition BFAST (Breaks For Additive Seasonal and Trend) avec la composante tendancielle  $T_t$ , la composante saisonnière  $S_t$  et la composante résiduelle  $\varepsilon_t$ , pour la série  $Y_t$  des moyennes de pH pondérées par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022.**

Les pH pondérés par le volume dans les eaux à l'exutoire de Waroneu augmentent depuis 1991 (fig. 37). La tendance calculée est de  $+0,0375$ , ce qui correspond à une augmentation du pH de 1,2 sur 32 ans. Cependant, l'analyse BFAST (fig. 38) de la série temporelle nous montre que, depuis 2014, les moyennes de pH diminuent.



**Figure 39 : composante saisonnière de l'ensemble de série temporelle ( $S_t$ ) des moyennes du pH pondérés par le volume dans les eaux de l'exutoire du bassin versant de Waroneu entre 1991 et fin 2022.**

Les pH dans les eaux à l'exutoire de Waroneu ne suivent pas de saisonnalité (fig. 39) contrairement à ce qu'on observe à La Robinette.

### - Conclusions

Nos données confirment, comme observé dans beaucoup de régions d'Europe, une diminution de la pollution atmosphérique résultant en une diminution des concentrations en substances acidifiantes et eutrophisantes dans eaux entrants et sortants des écosystèmes forestiers.

#### **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 (fig. 40). 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.

Un nouveau reportage a été réalisé en juillet 2023. Cinq parcelles sont reprises dans le réseau NEC : la parcelle W03 de chênes de Waroneu, les parcelles R07 d'essences feuillues en mélange, R08 d'épicéas en régénération de 1999, R09 d'épicéas adultes et la parcelle RD à découvert de La Robinette (fig 2, fig 3). Les données demandées sur les 5 dernières années (2018 à fin 2022) concernent les concentrations mensuelles en N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, S-SO<sub>4</sub>, Cl, P, azote total, ainsi que le pH et le volume des précipitations dans les pluviostats ou les eaux de pluie. Pour les eaux de la solution du sol récoltées par les bougies poreuses sur ces mêmes parcelles, nous avons fourni les concentrations moyennes mensuelles en N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, S-SO<sub>4</sub>, Cl, P, Azote total, DOC, Al, Ca, Mg, K, Fe, Mn, P et le pH. Des données complémentaires d'analyses de sols et de végétation sont aussi souhaitées. A titre indicatif cet échantillonnage représente le quart des données que la Belgique fournit à l'Europe pour les écosystèmes forestiers.

Les données de l'exutoire de La Robinette sont utilisées dans le cadre du suivi NEC des écosystèmes d'eau douce. Elles sont uniques de par la fréquence des analyses et de l'absence de perturbation d'origine anthropique sur le bassin versant. Les données fournies sont les concentrations moyennes mensuelles en N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, S-SO<sub>4</sub>, Cl, P, azote total, DOC, Al, Ca, Mg, Na, K, P, le pH et la conductivité ainsi que les précipitations annuelles.



Figure 40 : station météo opérationnelle dans le bassin versant de La Robinette depuis 2021.

La réalisation de profils du sol et de caractérisation physico-chimique (densité, C/N, pH, acidité d'échange) devraient être réalisées en fonction des budgets et du temps disponible. 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. 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	/
Assia Tahiri	100%	Technicienne	DNF (volet 1)	2	
Assia Tahiri	80%	Technicienne	DNF (volet 1)	10	/

M. A. Piret a été admis à la retraite en septembre 2022. Suite à l'augmentation des coûts salariaux, il n'a pas pu être remplacé.

### **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 sol 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.

A l'automne 2022, toujours en collaboration avec le laboratoire du Prof. Quentin Ponette, un échantillonnage de sol a été 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 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.

Le Dr. Anne Chandelier (CRA) est intervenue dans un cours du Prof. Carnol pour sensibiliser les étudiants aux maladies émergentes des essences forestières (mars 2022, mars 2023). Des 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
<b>Réaliser des mesures à long terme sur les concentrations et flux en éléments minéraux, et en carbone organique dans deux bassins versants forestiers</b>																	
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																	
<b>Fournir des mesures sur les indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers</b>																	
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)																	
<b>Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284</b>																	
Station météo																	
Sondes température/humidité sol																	
Echantillonnage caractérisation des sols																	
Analyses chimiques caractérisation sols																	
Analyse des données																	
<b>Valoriser et disséminer les résultats des recherches</b>																	
Rapports																	
Publications scientifiques																	
Autre																	

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 ».

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

[1] J. Bai et P. Perron, *Computation and analysis of multiple structural change models*, Journal of Applied Econometrics **18(1)** (2003), 1-22.

[2] R. M. Hirsch et J. R. Slack, *A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence*, Water Resources Research **20(6)** (1984), 727-732.

[3] H. B. Mann, *Nonparametric tests against trend*, Econometrica **13(3)** (1945), 245-259.

[4] J. Verbesselt, R. Hyndman, G. Newnham, et D. Culvenor, *Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series*, Remote Sensing of Environment **114(1)** (2010), 106-115.

[5] A. Zeilis, *A unified approach to structural change tests based on ML scores, F statistics, and OLS residuals*, Econometric Reviews **24(4)** (2005), 445-466.

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.
- Martin, C. W. & Harr, R. D., 1989: Logging of mature Douglas fir in western Oregon has little effect on nutrient output budgets.-Can.]. *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.
- 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](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-ZWYF200506018.htm).