



**ÉCOLOGIE VÉGÉTALE
ET MICROBIENNE**
Département Biologie,
Écologie, Évolution
Professeur M. CARNOL

Plan quinquennal de Recherches forestières 2019-2024

Subvention 2020-2021
Entre le Service public de Wallonie et l'Université de Liège

**ÉTUDE À LONG TERME DE LA BIOGÉOCHIMIE DES
ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS (2020)**

Action 0.5, Rapport d'activité, juin 2021

B. BOSMAN et M. CARNOL

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

Botanique, B22, chemin de la Vallée, 4, Sart Tilman, 4000 Liège, Tel. 04/366.38.45,
m.carnol@uliege.be

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 »	3
Préambule.....	3
A1. Justification et objectifs	3
A2. Méthode retenue	5
A3. Date d'approbation par le comité de pilotage	5
A4. Durée et coûts	5
A5. Calendrier 2020-2024 approuvée lors du Comité de Pilotage du 22 janvier 2021	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).....	7
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	8
B1. Introduction / contexte.....	8
B2. Travaux effectués	9
B3. Indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers.....	10
B.3.1. Introduction	10
B.3.2. Matériel et méthodes	11
B 3.3. Résultats et discussion préliminaires :.....	18
B.3.4. Discussion.....	24
B4. Collaborations diverses (tous niveaux confondus).....	24
B5. Activités de communication et de publications (déclinées par type – scientif., vulgarisation, conférences scientifiques, international, autres).....	25
B6. Perspectives et activités 2021-2022.....	25
B7. Bibliographie	26

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 de Recherches forestières 2019-2024. 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 »). Vu que ces recherches 2019-20 ont été clôturées et le rapport final approuvé (Bosman et al., 2020), celui-ci est disponible séparément.

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 par conséquent les recherches de la subvention 2020-21 (14 mois, 1 mai 2020-30 juin 2021).

A1. Justification et objectifs

Les sites de mesures à long terme 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 20 ans est un outil exceptionnel pour investiguer des processus lents (conséquences des changements climatiques, conséquences d'un changement des essences forestières, 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, maintenant incluse dans le Plan quinquennal de Recherches forestières 2019-2024, est la suite d'une série de subventions qui s'inscrivaient 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.). Ces subventions constituaient un complément à l'Accord cadre de recherche forestière et au suivi pédologique de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie. Les recherches répondent 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, pluviollessivats) et sortants (solution du sol, exutoire), ainsi que d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle de la qualité biologique des sols au sein de ces deux bassins versants et en Wallonie. 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 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. Étudier l'évolution à long terme des dépôts acides et azotés
5. Mise à niveau des sites dans le cadre de la directive NEC 2016/2284
6. Valoriser et disséminer les résultats des recherches

A3. Date d'approbation par le comité de pilotage

Action approuvée lors du Comité de Pilotage du 22 janvier 2021

A4. Durée et coûts

Durée de l'action : continue

Subvention de 14 MOIS (du 1er mai 2020 au 30 juin 2021) ; 262500 euros

A5. Calendrier 2020-2024 approuvée lors du Comité de Pilotage du 22 janvier 2021

	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 2021-24, 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 2-3 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.

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)

2020-2021 (14 mois)

Nom	ETP	Titre	Financement (volet du plan)	H.mois effectif	H.mois effectif Cumulé5 ans
Bernard Bosman	100%	Lic.	DNF (volet 1)	14	/
André Piret	50%-100%	technicien	DNF (volet 1)	9	/
Assia Tahiri	100%	technicienne	DNF (volet 1)	14	/

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 pluviolessivats. 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. Travaux effectués

Les activités effectuées entre le 1er mai 2020 et le 30 juin 2021 sont:

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

- Récolte mensuelle des pluies, des pluviolessivats, de la solution du sol et de l'eau à l'exutoire des bassins versants de la Robinette et de Waroneu
- Filtration et préparation des échantillons pour analyse
- Analyse de ces échantillons d'eaux pour le carbone et l'azote organique, les nitrates, l'ammonium, les phosphates, les sulfates, les chlorures, les éléments majeurs (Ca, K, Mg, Na, Al, Mn, Fe et Zn) et certains métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Cr, Cu)
- Mesure de la hauteur, de la circonférence à 1,30 mètres (c1.3), ainsi que la densité des arbres dont la hauteur est supérieure à 2 mètres dans les placettes d'étude intensive (1 an sur 2)

- Réparations des installations, suite à du vandalisme. Particulièrement les placettes W03 et W06 de Waroneu qui ont été saccagées trois fois au cours de l'hiver. Les sangliers ont causé des dommages répétitifs à la parcelle R10 de La Robinette ce printemps, pour y remédier une clôture électrifiée spécifique contre les sangliers a été installée
- Gestion de la base de données : encodage et vérification des résultats de chaque appareil d'analyse et des volumes récoltés, création des fichiers mensuels, compilation des fichiers mensuels en fichiers annuels avec contrôle qualité et encodage dans la base de données finale

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

- Sélection des sites d'échantillonnage
- Mise au point de la méthode Microresp
- Échantillonnage des sols
- Tamisage et préparation pour analyse
- Analyse des indicateurs chimiques et biologiques sélectionnés (incubations, extractions et analyses chimiques)
- Création d'une base de données
- Analyse statistique préliminaire des résultats

Cette recherche est présentée en détail au paragraphe B3.

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

- Inventaire de données descriptives complémentaires utiles
- Choix et installation (en cours) d'une station météo

B3. Indicateurs biologiques de la qualité des sols forestiers

B.3.1. Introduction

Une série d'indicateurs biologiques de la qualité des sols ont été sélectionnés, testés et étudiés au cours de subventions précédentes. Les indicateurs biologiques du sol sont de plus en plus pris en compte pour l'évaluation de la qualité des sols forestiers dans le contexte d'une gestion forestière durable. Les indicateurs biologiques comprennent la faune du sol (vers de terre, nématodes, collemboles) et les micro-organismes, à travers des mesures de leur abondance (biomasse), de leur activité (processus) et de leur diversité (structure des communautés). L'importance des micro-organismes du sol dans le contrôle des principaux processus biogéochimiques et leur croissance rapide dans des conditions favorables en font des indicateurs utiles de la qualité des sols, car ils peuvent fournir des indications plus précoces de changements dans le fonctionnement des sols que certains indicateurs non biotiques (chimiques).

La qualité du sol a été définie comme sa capacité à fonctionner comme un système vivant vital, au sein des limites de l'écosystème et de l'utilisation des terres. Cette qualité dépend des propriétés physiques, des processus chimiques et biologiques dans le sol ainsi que de leurs interactions. Sa caractérisation nécessite des indicateurs sensibles aux changements de végétation et d'hydrologie, et qui sont liés aux fonctions et processus du sol (Allen et al., 2011). La matière organique totale, le pH et les niveaux de nutriments, sont également largement utilisés. Cependant, les changements de ces paramètres au cours du temps sont relativement lents et donc ils fournissent des indications limitées pour des changements à court terme dans la qualité du sol. Les indicateurs biologiques, comme la biomasse et l'activité microbienne, peuvent être plus facilement liés à des processus du sol que les indicateurs physiques et chimiques car c'est l'activité directe des micro-organismes qui dirige de nombreuses fonctions et processus du sol.

La quantité et la composition biochimique de la litière et les exsudats racinaires peuvent varier considérablement d'une espèce d'arbre à l'autre, de sorte que la disponibilité des nutriments pour les micro-organismes peut être très différente dans les peuplements forestiers de composition d'espèces et de peuplements d'âge variés (Carnol et Bazgir, 2013). L'utilisation d'indicateurs biologiques pour évaluer la qualité des sols est relativement nouvelle et leur utilisation est un défi face aux indicateurs plus conventionnels parce que les bio-indicateurs sont plus variables dans l'espace et dans le temps que les indicateurs physiques et chimiques. En tant que tels, leur nouveauté et leur variabilité signifie qu'il y a actuellement un manque de valeurs de base pour de nombreux indicateurs, en particulier dans les écosystèmes forestiers, et il existe un besoin de définir des valeurs de référence dans différentes conditions environnementales et différentes localisations.

Nous nous sommes concentrés sur des indicateurs biologiques « classiques » fréquemment utilisés dans les réseaux de surveillance et en particulier sélectionnés pour leur pertinence, leur facilité d'utilisation, leur coût limité et leur interprétabilité (Ratcliffe et al., 2018).

B.3.2. Matériel et méthodes

Trente sites ont été échantillonnés entre le 6 et le 19 Novembre 2020, majoritairement dans les Ardennes (Fig. 1, 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. 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 champ (WHC, voir ci-dessous).

Les 60 échantillons ont été analysés pour:

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

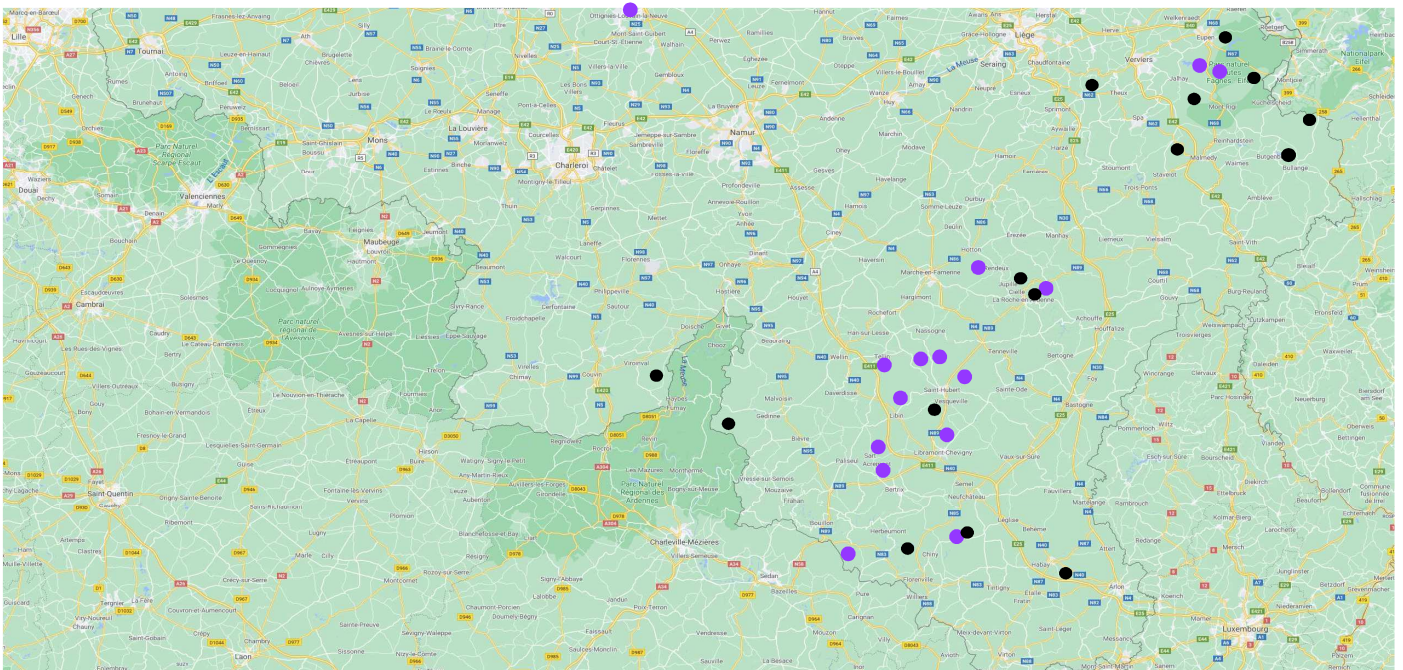


Fig. 1: situation géographique des 30 sites échantillonnés en Novembre 2020 ; les points mauves sont les sites sous hêtre, les noirs sous épicéa.

Tableau 1 : Sites échantillonnés, numéros de carreaux IGN (CAROING), 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	Tannheck	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. Environ cinq grammes de sol frais sont pesés dans un creuset qui est ensuite placé dans un four à 105°C pendant au moins trois heures. L'humidité du sol est calculée à l'aide de l'équation :

$$E\% = ((\text{poids frais} - \text{poids sec}) / \text{poids frais}) * 100$$

La perte au feu (LOI – « loss on ignition ») donne une indication de la quantité de matière organique du sol perdue après calcination à 550°C. Les échantillons, après séchage à 105°C, sont placés au four à mouffles à 550°C pendant une nuit. La teneur en matière organique est calculée à l'aide de l'équation :

$$\text{LOI}\% = ((\text{poids sec (105°C)} - \text{poids sec (550°C)}) / \text{poids sec (105°C)}) * 100$$

Une estimation du carbone organique total (Corg) est obtenue en divisant la perte au feu (LOI) par 1.72.

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 CaCl₂ 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 mis à 60 % de capacité au champ. 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-NH₄⁺ et N-NO₃⁻ pendant 28 jours à 20°C. Le contenu en N- NO₃⁻ et N- NH₄⁺ 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.

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⁻¹ sol sec jour⁻¹.

La nitrification relative est le rapport de $N\text{-NO}_3^-$ produits / N_{min} *100. Elle est exprimée en pourcent.

La respiration potentielle (C-CO₂) :

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 CO₂ et sa production reflète leur degré d'activité.

La respiration potentielle est mesurée par la production de CO₂ au cours d'une incubation de 3h à 20°C. La vitesse de production de CO₂ (exprimée en $\mu\text{g de C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$ de sol sec h^{-1}) est calculée à partir de la régression linéaire des concentrations en C-CO₂ en fonction du temps.

La biomasse microbienne (C_{mic}, N_{mic} et P_{mic})

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_{mic} et le N_{mic}, chaque échantillon de sol est réparti en deux aliquotes ; l'un est directement soumis à une extraction au K₂SO₄ 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_{mic}) 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_{mic} est exprimé en mg C kg^{-1} sol sec.

La teneur en azote dans la biomasse microbienne (N_{mic}) 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 $\text{mg N-N}_{\text{tot}} \text{ kg}^{-1}$ sol sec.

Pour déterminer le phosphore microbien du sol (P_{mic}, mg kg^{-1}), la fumigation au chloroforme est suivie d'une extraction au NaHCO₃ 0.5 M (Brookes et al., 1982). La teneur en phosphore dans la biomasse microbienne (P_{mic}) 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 (qCO₂)

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-CO₂ produite par la respiration du sol et la quantité de C_{mic} contenue dans celui-ci. Une grande efficacité à utiliser le substrat est donnée par une valeur faible du qCO₂. Le quotient métabolique du CO₂ est exprimé en $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (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 μ . 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 MicroRespTM a été utilisé. Cette méthode de colorimétrie permet de mesurer la production de CO₂ 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 α -cétoglutarique) et du N-Acetyl D-Glucosamine. Le CO₂ 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 CO₂ dégagée.

La densité optique à 570 nm est mesurée pour chaque puits avec un spectrophotomètre SynergyMx (Biotek) afin de déterminer cette quantité de CO₂ émise.

Cations échangeables

Les cations échangeables ont été extraits au BaCl₂ (Campbell et al., 2003) avec 4 g de sol frais et 40 ml d'une solution de BaCl₂ 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 BaCl₂. 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 Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺ (cmolc kg⁻¹) (Ross & Ketterings, 1995).

Analyses statistiques

L'effet des espèces (hêtre vs épicéa) et des horizons (organique vs minéral) sur les indicateurs biologiques des sols a été analysé avec une ANOVA 2 pour résultats des 30 placettes échantillonnées (Statistica 10). Comme l'interaction 'espèces /horizons' était significative, nous avons séparé les analyses et réalisé des T-tests pour étudier les différences entre les deux essences dans chacun des deux horizons séparément. Nous présentons les premiers résultats dans ce rapport.

B 3.3. Résultats et discussion préliminaires

Le carbone, l'azote et le phosphore microbien

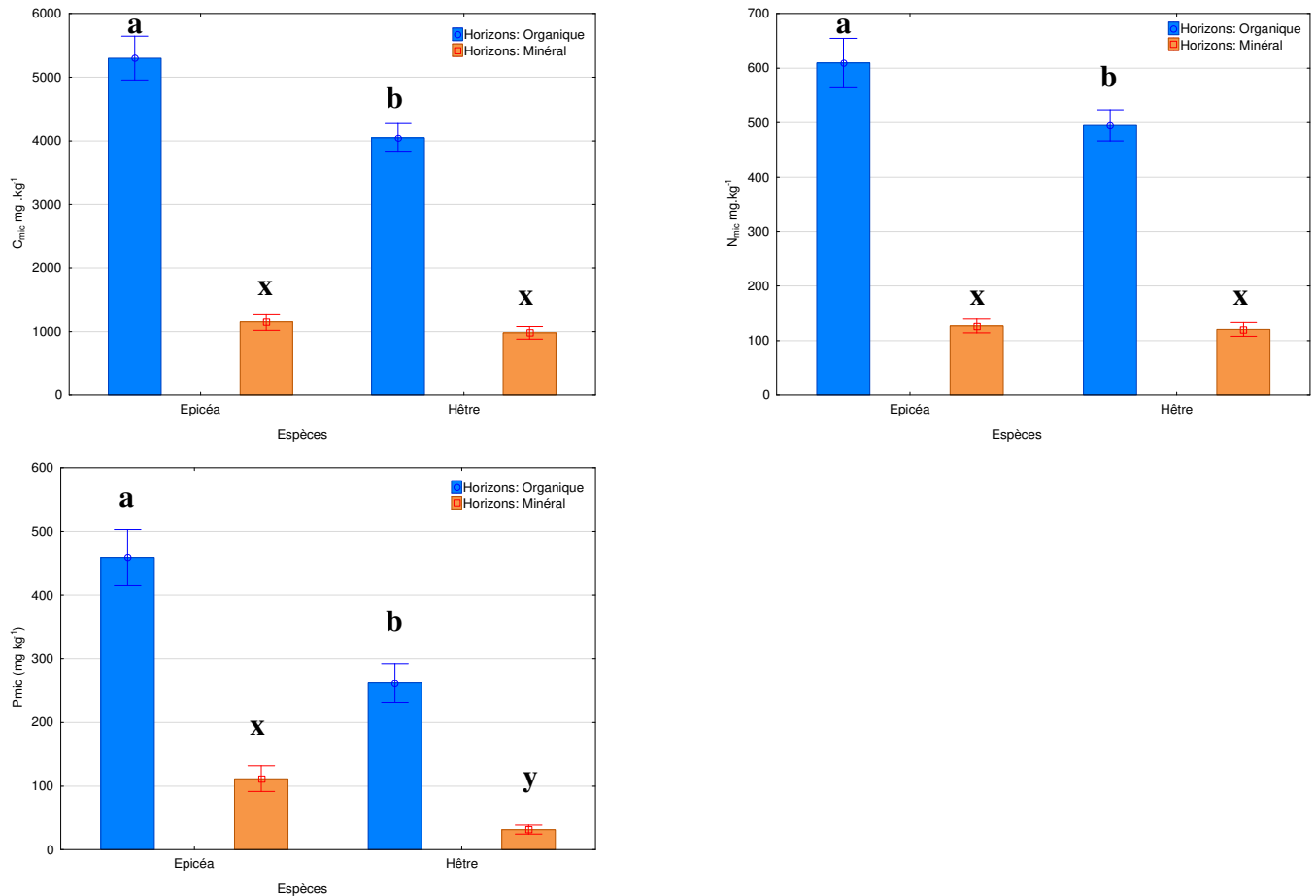


Figure 2 : moyenne et erreur type (n=15) du carbone (C_{mic}), de l'azote (N_{mic}) et du phosphore (P_{mic}) microbien (mg kg⁻¹) dans le sol des deux horizons sous épicéa et hêtre. Des lettres différentes montrent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les sols des deux espèces dans chaque horizon séparément.

Le carbone, l'azote et le phosphore microbien sont significativement plus élevés dans les sols de l'horizon organique des placettes sous épicéa (5298 mg de C_{mic} kg⁻¹, 609 mg de N_{mic} kg⁻¹ et 459 mg de P_{mic} kg⁻¹) que sous hêtre (4048 mg de C_{mic} kg⁻¹, 495 mg de N_{mic} kg⁻¹ et 262 mg de P_{mic} kg⁻¹). Dans l'horizon minéral seul le phosphore microbien est significativement supérieur sous épicéa que sous hêtre (respectivement 112 et 32 mg de P_{mic} kg⁻¹) (Fig. 2).

Utilisation des sources de carbone par les micro-organismes

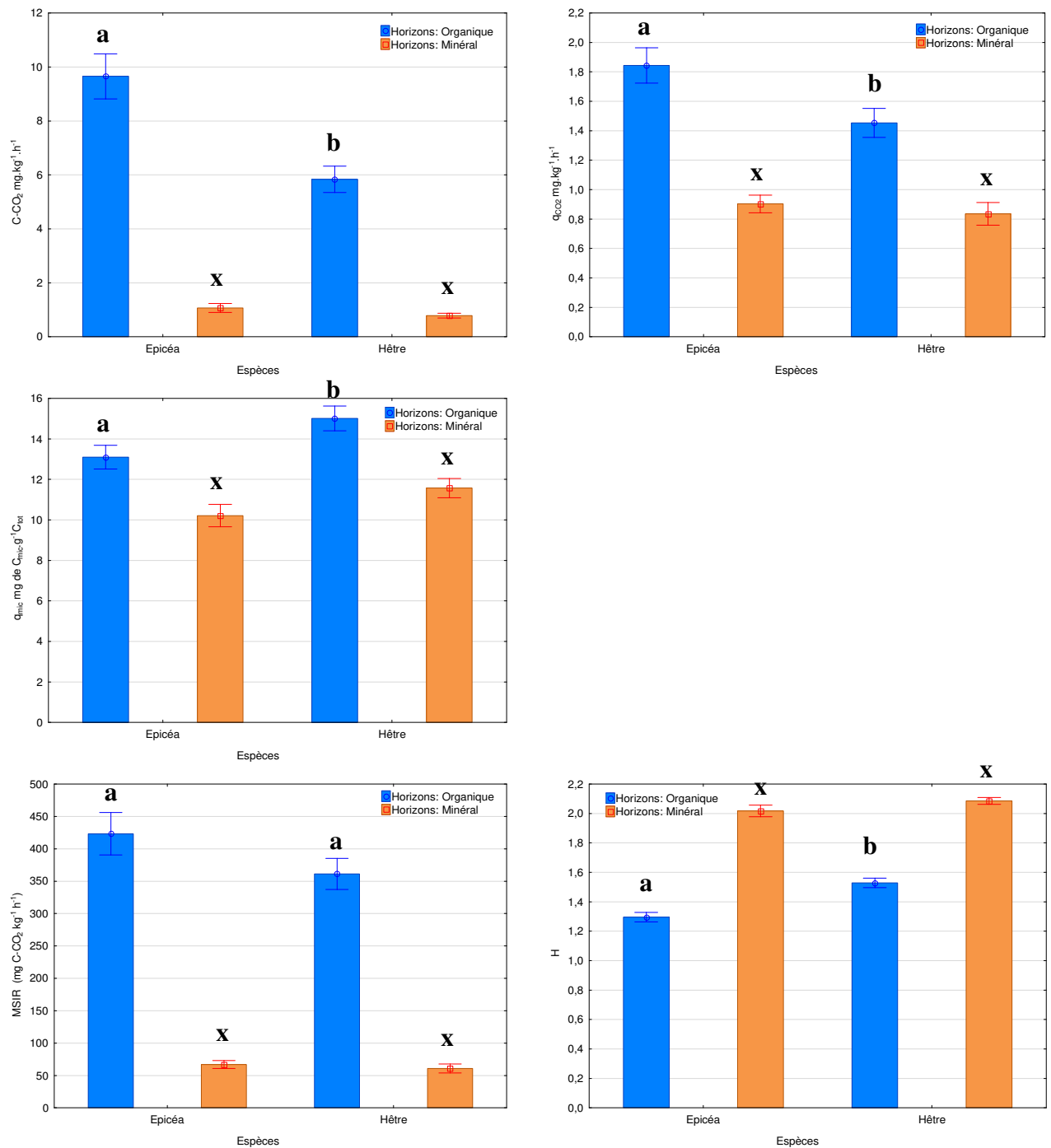


Figure 3 : moyenne et erreur type (n=15) de la respiration potentielle (mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), du qCO₂ (mg kg⁻¹ h⁻¹), du q_{mic} (mg C_{mic} g⁻¹ C_{tot} h⁻¹), de l'indice de potentiel métabolique MSIR (mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) et de l'indice de Shannon H dans le sol des deux horizons sous épicéa et hêtre. Des lettres différentes montrent des différences significatives (p < 0.05) entre les sols des deux espèces dans chaque horizon séparément.

La respiration potentielle est plus élevée dans l'horizon organique du sol sous épicéa que sous hêtre (9.65 et 5.84 mg C-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹). Le quotient métabolique (qCO₂) plus élevé sous les épicéas (1.84 et 1.45 mg kg⁻¹ h⁻¹) et le quotient microbien (q_{mic}) plus faible sous les épicéas (13.1 et 15.01 mg de C_{mic} g⁻¹ C_{tot}) indiquent de la matière organique disponible pour

les micro-organismes serait de meilleure qualité sous les hêtres (Fig. 3). Le potentiel métabolique (MSIR pour Multiple Substrate Induced Respiration) est la somme des respirations induites des 7 substrats carbonés sélectionnés, et elle n'est pas significativement différente dans les sols des deux essences. Par contre l'indice de Shannon H, qui dans ce cas particulier est plus un indicateur de l'homogénéité d'utilisation des substrats plutôt qu'un indice de diversité, est plus élevé dans le sol organique sous hêtre (1.53) que sous épicéa (1.29). Il n'y a pas de différence significative pour les indicateurs d'utilisation du carbone dans les horizons minéraux.

Disponibilité en C et N pour les micro-organismes

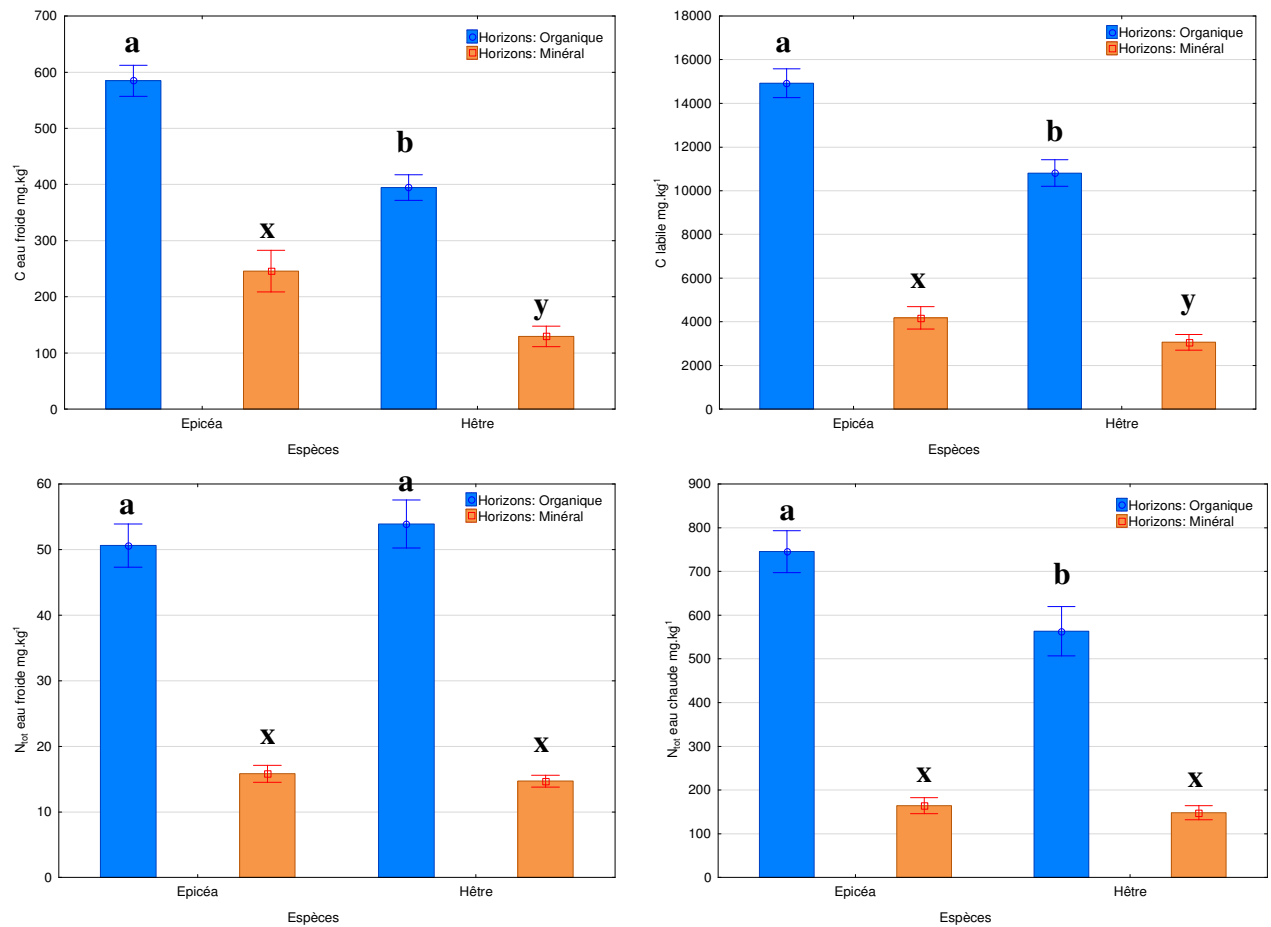


Figure 4 : moyenne et erreur type (n=15) du carbone et de l'azote extraient à l'eau froide et à l'eau chaude (labile) (mg kg⁻¹) dans le sol des deux horizons sous épicéas et hêtres. Des lettres différentes montrent des différences significatives (p < 0.05) entre les sols des deux espèces dans chaque horizon séparément.

Les concentrations en carbone soluble (extraction eau froide) et labile (extraction eau chaude) sont plus élevées dans les sols sous épicéas pour les deux horizons étudiés. Il n'y a pas de différences significatives pour les concentrations en azote extrait à l'eau froide entre les deux essences dans chaque horizon. L'azote labile est plus élevé sous dans les sols de l'horizon organique sous épicéa (Fig. 4).

Minéralisation nette de l'azote (Nmin) et nitrification relative

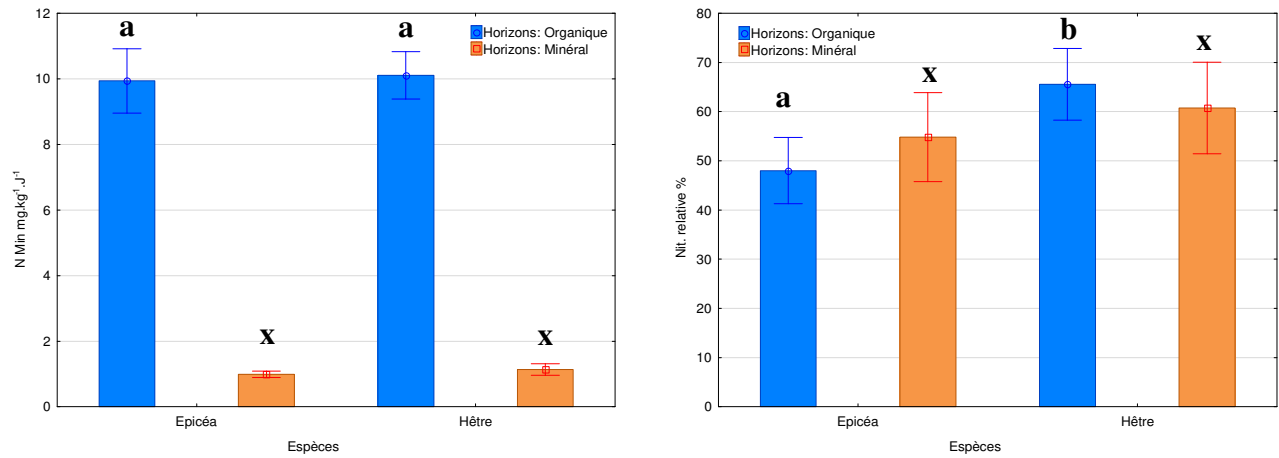


Figure 5 : moyenne et erreur type (n=15) de la minéralisation nette de l'azote (Nmin) (mg kg⁻¹ j⁻¹) et de la nitrification relative (%) dans le sol des deux horizons sous épicéa et hêtre. Des lettres différentes montrent des différences significatives (p < 0.05) entre les sols des deux espèces dans chaque horizon séparément.

Il n'y a pas de différence significative pour la minéralisation nette sous épicéa et hêtre, pour les deux horizons étudiés. La nitrification relative, indicateur potentiel d'une nitrification plus élevée, est plus importante dans le sol de l'horizon organique sous hêtre que sous épicéa (61 % par rapport à 37 %) (Fig. 5).

Cations échangeables et pH

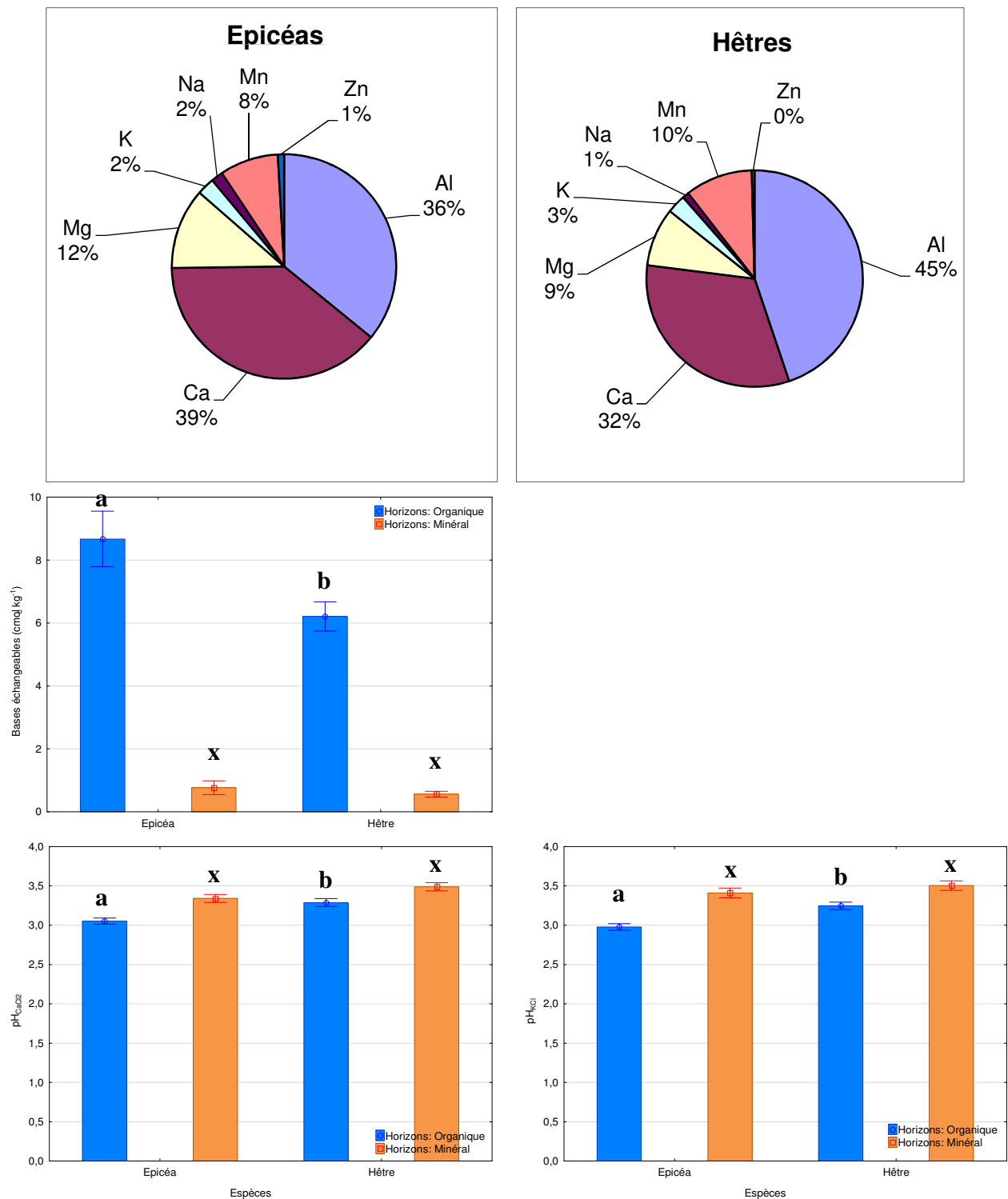


Figure 6 : proportion des éléments échangeables dans l'horizon organique pour les deux essences ; moyenne et erreur type (n=15) des bases échangeables ($\text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$) ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) ; pH KCl et pH CaCl_2 dans le sol des deux horizons sous épicéa et hêtre (les analyses statistiques ont été réalisées sur les concentrations en H^+). Des lettres différentes montrent des différences significatives ($p < 0.05$) entre les sols des deux espèces dans chaque horizon séparément.

Les bases échangeables (Ca^{2+} , K^+ et Mg^{2+}) sont en concentrations plus importantes dans les sols de l'horizon organique sous épicéa (8.67 et $6.21 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$), ce qui se traduit par une

plus grande proportion d'aluminium sur le complexe d'échange. Le pH KCl et le pH CaCl₂ sont plus faibles dans les sols de l'horizon organique sous les épicéas (respectivement 2.98 et 3.25 ; 3.05 et 3.29) (Fig. 6).

B.3.4. Discussion

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. Seules des valeurs plus élevées sous épicéa sont observées dans l'horizon minéral pour P_{mic}, C soluble et labile, ainsi que N labile.

Dans l'horizon organique, la biomasse microbienne (C, N, P), l'activité microbienne (respiration potentielle et potentiel métabolique), le C soluble et labile sont plus élevés sous épicéa. La biomasse microbienne plus élevée sous épicéa, pourrait être liée à la disponibilité en substrats carbonés, plus importante. Par contre, l'indice de Shannon plus faible sous épicéa pourrait témoigner d'une communauté microbienne moins diversifiée et plus spécialisée dans la dégradation de certaines sources de carbone plus abondantes. Cette observation peut être mis en lien avec un quotient métabolique plus élevé et un quotient microbien plus faible sous épicéa, indiquant que la matière organique disponible pour les micro-organismes serait de meilleure qualité sous hêtre.

En ce qui concerne le P, identifié comme un élément qui pouvait poser un risque nutritionnel élevé (avec le magnésium) dans certains sites de la forêt wallonne (Ponette et al., 2018, 2020), le P microbien peut représenter un réservoir et une source importants, voir primordiale dans des sols acides (Zederer et al., 2017). La présence de l'épicéa pourrait ainsi, mieux que le hêtre, atténuer la faible disponibilité minérale en P, observée dans les horizons profonds.

L'acidité plus faible sous épicéa pourrait expliquer la plus faible nitrification relative, le processus de nitrification étant sensible à l'acidité.

B4. 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 l'équipe 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 meilleures outils pour évaluer les processus au sein des sols forestiers.

B5. Activités de communication et de publications (déclinées par type – scientifique, vulgarisation, conférences scientifiques, international, autres)

néant

B6. Perspectives et activités 2021-2022

Les activités planifiées entre le 01 juillet 2021 et le 30 juin 2022 sont :

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

- Étudier l'évolution à long terme des dépôts acides et azotés
- Récoltes et analyses chimiques
- Gestion de la base de données

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

- Analyse approfondie des données
- Création d'une base de données sols (bassins versants)

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

- Installation de la station météo
- Installation des sondes température / humidité sol
- Échantillonnage et caractérisation des sols
- Analyses chimiques caractérisation sols
- Analyse de données caractérisation sols

Valoriser et disséminer les résultats des recherches

- Rapports
- Prise de contact avec Forêt wallonne pour une publication de vulgarisation
- Préparation d'une publication scientifique concernant l'échantillonnage réalisé sous hêtre et épicéa

B7. Bibliographie

- 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).
- Ponette, Q., Joussemet, F., & Titeux, H. (2020). *Identification des zones à risques nutritionnels Rapport succinct*.
- Ponette, Q., Titeux, H., & Cassart, B. (2018). *Identification des zones à risques nutritionnels*.
- 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.
- Zederer, D. P. Talkner, U. Spohn, M. et Joergensen R. G., 2017. *Microbial biomass phosphorus and C/N/P stoichiometry in forest floor and A horizons as affected by tree species*. *Soil Biology & Biochemistry*, 111: 166-175.